



**Développement d'une méthodologie d'analyse
coût-bénéfice en vue d'évaluer le potentiel de réduction
des impacts environnementaux liés au confort d'été : cas
des climatiseurs individuels fixes en France
métropolitaine**

Laurent Grignon-Massé

► **To cite this version:**

Laurent Grignon-Massé. Développement d'une méthodologie d'analyse coût-bénéfice en vue d'évaluer le potentiel de réduction des impacts environnementaux liés au confort d'été : cas des climatiseurs individuels fixes en France métropolitaine. Sciences de l'ingénieur [physics]. École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2010. Français. NNT : 2010ENMP1702 . pastel-00006187

HAL Id: pastel-00006187

<https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00006187>

Submitted on 29 Jun 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Ecole doctorale n° 432-SMI : Sciences des Métiers de l'Ingénieur

Doctorat ParisTech

T H È S E

pour obtenir le grade de docteur délivré par

l'École nationale supérieure des mines de Paris

Spécialité "Energétique "

présentée et soutenue publiquement par

Laurent GRIGNON-MASSE

le 20 mai 2010

**Développement d'une méthodologie d'analyse coût-bénéfice en vue
d'évaluer le potentiel de réduction des impacts environnementaux liés au
confort d'été : cas des climatiseurs individuels fixes en France
métropolitaine.**

Directeur de thèse : **Jérôme ADNOT**

Co-encadrement de la thèse : **Philippe RIVIERE**

Jury

M. Francis ALLARD, Professeur, LEPTAB, Université de La Rochelle
M. Bernard LACHAL, Professeur, CUEPE, Université de Genève
M. Jérôme ADNOT, Professeur, CEP, MINES ParisTech
M. Dominique MARCHIO, Professeur, CEP, MINES ParisTech
M. Matthieu ORPHELIN, Docteur, ADEME
M. Philippe RIVIERE, Docteur, CEP, MINES ParisTech

Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur
Examineur
Examineur

*Pour trouver une aiguille dans une botte de foin, c'est facile :
brûlez la botte et l'aiguille apparaîtra.*

Pierre Dac

L'Os à moelle, Juin 1938

Remerciements

Ce travail de recherche a été mené au sein de l'équipe Maîtrise de la Demande en Energie du Centre Énergétique et Procédés (CEP) de MINES-ParisTech. Je tiens ici à remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin au bon déroulement de cette thèse.

Je souhaite tout d'abord remercier mon directeur de thèse, Jérôme ADNOT, et mon maître de thèse, Philippe RIVIERE, pour m'avoir accueilli dans leur équipe et m'avoir épaulé dans la réalisation de cette thèse. J'ai eu la chance de bénéficier d'encadrants positifs, attentifs et pleins d'humour. Je leurs suis reconnaissant de m'avoir fait confiance et de m'avoir permis de réaliser cette thèse dans la sérénité.

Mes remerciements vont également à mes rapporteurs et examinateurs – Bernard LACHAL, Francis ALLARD et Matthieu ORPHELIN – pour avoir accepté de participer au jury et m'avoir suggéré de nombreux conseils et pistes de réflexion.

Un grand merci à Dominique MARCHIO qui m'a fait l'honneur de présider mon jury de thèse. Je lui suis très reconnaissant de m'avoir fait confiance à plusieurs reprises dans le cadre d'activités d'enseignement et contractuelles. J'ai eu plaisir à travailler avec lui et ses conseils m'ont beaucoup apporté.

Je souhaite exprimer ma gratitude envers Pascal STABAT qui a souvent été disponible pour m'écouter et discuter. Ses conseils et commentaires m'ont fait réfléchir et, j'espère, progresser sur de nombreux aspects...

Je suis également reconnaissant à Anne-Marie POUGIN, Aline GARNIER, Michèle DUPUY, Maryvonne NICA, Marie-Astrid KRAMES et Philippe CALVET pour leur soutien administratif et informatique. Ils m'ont permis d'effectuer cette thèse dans de très bonnes conditions.

Pour la bonne ambiance qui règne au sein de l'équipe MDE et dont j'ai pu profiter, je tiens à remercier les différents collègues que j'ai pu y croiser : des vieux de la vieille – Daniela BORY et Maxime DUPONT – aux plus jeunes – Maxime RAYNAUD, Bruno FILLIARD et Julien CAILLET – sans oublier David DA SILVA, avec qui j'ai appris les rudiments de la simulation de bâtiments, Marcello CACIOLO et Mikael PHILIPPE, toujours prompts à plaisanter, ainsi que Bruno DUPLESSIS pour sa bonne humeur et ses traits d'esprit. Plus particulièrement, j'adresse mes remerciements sincères à Anthony BENOIST qui fut un voisin de bureau et ami précieux. J'ai pu apprécier chez lui son humour décapant, ses goûts musicaux et son sens aigu de la psychologie humaine.

Je tiens à exprimer toute ma sympathie et mon attachement à mes amis et à ma famille. Je remercie tout particulièrement ceux qui se sont déplacés lors de ma soutenance et ont participé à la préparation du pot. J'en profite pour exprimer ma profonde affection à mes parents pour leur générosité et pour l'ensemble de ce qu'ils m'ont apporté.

Enfin, mes derniers remerciements vont à Sterenn. Merci pour ton soutien, ta patience et ta douceur... Merci d'être à mes côtés tout simplement, et ce, pour mon plus grand bonheur...

Table des matières

TABLE DES MATIERES	1
---------------------------	----------

<u>CHAPITRE 1. FORMULATION DES OBJECTIFS DU TRAVAIL DE THESE ET DEVELOPPEMENT D'UNE METHODOLOGIE</u>	<u>7</u>
---	-----------------

TABLE DES MATIERES	9
---------------------------	----------

INTRODUCTION	11
---------------------	-----------

1.1 LA PROBLEMATIQUE DE LA CLIMATISATION INDIVIDUELLE DANS LES CONTEXTES EUROPEEN ET FRANÇAIS	13
--	-----------

1.1.1 DESCRIPTION DES APPAREILS DE CLIMATISATION INDIVIDUELLE	13
---	----

1.1.2 UNE AUGMENTATION STRUCTURELLE DE L'USAGE DE LA CLIMATISATION INDIVIDUELLE	14
---	----

1.1.3 DES IMPACTS ENERGETIQUES ET ENVIRONNEMENTAUX IMPORTANTS	18
---	----

1.1.4 PANORAMA DE SOLUTIONS PERMETTANT DE REDUIRE LES IMPACTS LIES A L'USAGE DE LA CLIMATISATION INDIVIDUELLE	19
---	----

1.1.5 CONTEXTE REGLEMENTAIRE CONCERNANT LA REDUCTION DES IMPACTS LIES AU CONFORT D'ETE INDIVIDUEL	20
---	----

1.1.6 CONCLUSIONS	22
-------------------	----

1.2 L'EVALUATION DES PROGRAMMES D'ECONOMIES D'ENERGIE	23
--	-----------

1.2.1 TERMINOLOGIE ADOPTEE	23
----------------------------	----

1.2.2 L'EVALUATION DES ECONOMIES D'ENERGIE ENGENDREES PAR LES PROGRAMMES DE MDE	24
---	----

1.2.3 EVALUATION DE L'EFFICIENCE ECONOMIQUE DES PROGRAMMES DE MDE	25
---	----

1.2.4 CONCLUSIONS	29
-------------------	----

1.3 FORMULATION DES OBJECTIFS ET DEVELOPPEMENT D'UNE METHODOLOGIE	30
--	-----------

1.3.1 FORMULATION DES OBJECTIFS	30
---------------------------------	----

1.3.2 PRISE EN COMPTE DES SPECIFICITES LIEES A L'EVALUATION D' ACTIONS DE MDE RELATIVES AU CONFORT D'ETE	30
--	----

1.3.3 CONCLUSION : METHODOLOGIE DEVELOPPEE	32
--	----

<u>CHAPITRE 2. MONETISATION DE L'INCONFORT ET DES EXTERNALITES</u>	<u>35</u>
---	------------------

TABLE DES MATIERES	37
---------------------------	-----------

INTRODUCTION	39
---------------------	-----------

2.1 ANALYSE DES METHODES D'EVALUATION DU CONFORT THERMIQUE DANS LES BATIMENTS CLIMATISES ET NON CLIMATISES	41
---	-----------

2.1.1 PRESENTATION DES PHENOMENES REGISSANT LE CONFORT THERMIQUE	41
--	----

2.1.2 PRESENTATION DE L'APPROCHE ANALYTIQUE	45
---	----

2.1.3 L'APPROCHE ADAPTATIVE	51
-----------------------------	----

2.1.4 CONCLUSIONS	58
-------------------	----

2.2 APERÇU DES METHODES DE MONETISATION DES BIENS ET SERVICES NON MARCHANDS (EXTERNALITES ET COUTS PRIVES)	59
---	-----------

2.2.1 LES METHODES BASEES SUR L'EXPERTISE DES DOMMAGES (OU DE LA DETERIORATION DE BENEFICES)	59
--	----

2.2.2 LES METHODES BASEES SUR LES PREFERENCES INDIVIDUELLES (DETERMINATION DU CONSENTEMENT A PAYER)	59
---	----

2.3 MONETISATION DES COUTS D'INCONFORT	61
---	-----------

2.3.1 LES CONSEQUENCES DE L'INCONFORT THERMIQUE D'ETE	61
---	----

2.3.2 MONETISATION DE L'INCONFORT DANS LE SECTEUR TERTIAIRE	62
---	----

2.3.3 MONETISATION DE L'INCONFORT THERMIQUE DANS LE SECTEUR RESIDENTIEL	67
---	----

2.3.4 ETUDE DU CONFORT ACOUSTIQUE	70
-----------------------------------	----

2.4	MONETISATION DES EXTERNALITES LIEES AU CONFORT D'ETE	72
2.4.1	DETERMINATION DES EXTERNALITES A PRENDRE EN COMPTE DANS CETTE ETUDE	72
2.4.2	MONETISATION DES EXTERNALITES ENVIRONNEMENTALES (HORS EFFET DE SERRE)	73
2.4.3	MONETISATION DES EXTERNALITES LIEES AU CHANGEMENT CLIMATIQUE	76
2.4.4	ETUDE DES EXTERNALITES NON-ENVIRONNEMENTALES	81
2.4.5	CALCUL DES EXTERNALITES ASSOCIEES A LA CONSOMMATION D'ENERGIE	84
2.5	CONCLUSION : RECAPITULATIF DES METHODES RETENUES POUR LA SUITE DE L'ETUDE QUANT A L'EVALUATION ET LA MONETISATION DE L'INCONFORT ET DES EXTERNALITES	88

CHAPITRE 3. ETUDE D' ACTIONS D'AMELIORATION DU CONFORT D'ETE PORTANT SUR L'ENVELOPPE ET L'USAGE DU BATIMENT

91

TABLE DES MATIERES	93
INTRODUCTION	95
3.1 DEVELOPPEMENT D'UNE METHODOLOGIE D'EVALUATION DES ACTIONS PORTANT SUR L'ENVELOPPE ET L'USAGE DES BATIMENTS	97
3.1.1 DESCRIPTION GENERALE DE L'APPROCHE D'EVALUATION ADOPTEE	97
3.1.2 SPECIFICATION DE L'ENVIRONNEMENT DE SIMULATION	98
3.1.3 SELECTION DES ACTIONS A EVALUER DANS LE CADRE DE CE CHAPITRE	104
3.2 ETUDE DU POTENTIEL D' ACTIONS PORTANT SUR L'ENVELOPPE ET L'USAGE DU BATIMENT EN TERMES DE REDUCTION DES BESOINS DE REFROIDISSEMENT ET D'AMELIORATION DU CONFORT ESTIVAL	108
3.2.1 ETUDE DES BESOINS D'ENERGIE ET DU CONFORT ESTIVAL DANS LES PIECES DE REFERENCE	108
3.2.2 SPECIFICATION TECHNIQUE DES ACTIONS ETUDIEES DANS LE SECTEUR TERTIAIRE	113
3.2.3 POTENTIEL D'AMELIORATION DU CONFORT D'ETE DANS LE SECTEUR TERTIAIRE	116
3.2.4 DESCRIPTION TECHNIQUE DES ACTIONS ETUDIEES POUR LE RESIDENTIEL	120
3.2.5 POTENTIEL DE REDUCTION DES BESOINS DE REFROIDISSEMENT ET D'AMELIORATION DU CONFORT DANS LE SECTEUR RESIDENTIEL	122
3.3 ETUDE DU CONFORT D'ETE DANS LES BATIMENTS RENOVES DANS UNE OPTIQUE DE REDUCTION DES CONSOMMATIONS DE CHAUFFAGE	124
3.3.1 IMPACT D' ACTIONS DE RENOVATION ORIENTEES « CHAUFFAGE » SUR LE CONFORT D'ETE	124
3.3.2 AMELIORATION DU CONFORT D'ETE DANS LES BATIMENTS RENOVES	128
3.3.3 CONCLUSIONS	132
3.4 CONFORT D'ETE ET PERSPECTIVE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE	133
3.4.1 CHANGEMENT CLIMATIQUE : ADAPTATION ET ATTENUATION	133
3.4.2 PRESENTATION DES FICHIERS CLIMATIQUES UTILISES	135
3.4.3 IMPACT SUR LA DEMANDE D'ENERGIE ET LE CONFORT D'ETE	136
3.5 EVALUATION DES COUTS GENERALISES ASSOCIES AUX ACTIONS D'AMELIORATION DU CONFORT D'ETE	139
3.5.1 HYPOTHESES DE COUTS CONCERNANT LES BIENS MARCHANDS LIES A L'AMELIORATION DU CONFORT D'ETE	139
3.5.2 EVALUATION DES COUTS D'INCONFORT	142
3.6 CONCLUSIONS ET PREMIERES RECOMMANDATIONS	146

CHAPITRE 4. EVALUATION DES PERFORMANCES ENVIRONNEMENTALES DES CLIMATISEURS INDIVIDUELS ET PERSPECTIVES D'AMELIORATION

149

TABLES DES MATIERES	151
INTRODUCTION	153
4.1 DEVELOPPEMENT D'UNE METHODE DE CARACTERISATION DES PERFORMANCES ENERGETIQUES DES APPAREILS	155
4.1.1 EVOLUTION SAISONNIERE DES PERFORMANCES ENERGETIQUES	155

4.1.2	DETERMINATION D'INDICES DE PERFORMANCES SAISONNIERES EN MODE REFROIDISSEMENT (SEER) ET EN MODE CHAUFFAGE (SCOP)	161
4.2	ANALYSE DU CYCLE DE VIE DES CLIMATISEURS INDIVIDUELS	175
4.2.1	DETERMINATION ET SPECIFICATION DES APPAREILS DE REFERENCE	175
4.2.2	COLLECTE DES DONNEES NECESSAIRES A L'ACV	178
4.2.3	IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES CAS DE REFERENCE	182
4.2.4	CONCLUSIONS : POTENTIELS D'AMELIORATION IDENTIFIES	185
4.3	PERSPECTIVES D'AMELIORATION DES PERFORMANCES ENVIRONNEMENTALES DES APPAREILS	186
4.3.1	DETERMINATION DES COUTS ASSOCIES AUX CAS DE REFERENCE	186
4.3.2	AMELIORATION DE L'EFFICACITE ENERGETIQUE DES CLIMATISEURS : PERSPECTIVES D'EVOLUTION DES INDICES DE PERFORMANCES SAISONNIERES	187
4.3.3	REDUCTION DES IMPACTS LIES AU CYCLE DE VIE DES FLUIDES FRIGORIGENES	190
4.4	CONCLUSION : RETOUR SUR LE TRAVAIL PRESENTE DANS CE CHAPITRE ET SUR SON CONTEXTE GENERAL	192

CHAPITRE 5. EVALUATION DU POTENTIEL DE REDUCTION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX LIES AU CONFORT D'ETE	195
--	------------

TABLES DES MATIERES	197
INTRODUCTION	199
5.1 APPROCHE ADOPTEE POUR L'EVALUATION ECONOMIQUE DES ACTIONS D'AMELIORATION DU CONFORT D'ETE	201
5.1.1 ASPECTS METHODOLOGIQUES RELATIFS A L'EVALUATION DES COUTS ET AVANTAGES	201
5.1.2 PRESENTATION DE L'APPROCHE D'EVALUATION TECHNICO-ECONOMIQUE DES SOLUTIONS D'AMELIORATION DU CONFORT D'ETE	205
5.2 ANALYSE COUT-BENEFICE « PRIVEE » D' ACTIONS D'AMELIORATION DU CONFORT D'ETE	209
5.2.1 DESCRIPTION DE LA SITUATION DE REFERENCE	209
5.2.2 RESULTATS DE L'ANALYSE COUT-BENEFICE « PRIVE » DES ACTIONS D'AMELIORATION DU CONFORT ESTIVAL	211
5.2.3 LUTTER CONTRE LA RATIONALITE LIMITEE DES AGENTS ECONOMIQUES PRIVES : L'EXEMPLE DES EXIGENCES MINIMALES DE PERFORMANCE PORTANT SUR LES APPAREILS DE CLIMATISATION	221
5.2.4 L'ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE : LES TRANSFORMATIONS A PREVOIR CONCERNANT LE CONFORT D'ETE	224
5.3 ANALYSE COUT-BENEFICE SOCIETALE D' ACTIONS D'AMELIORATION DU CONFORT D'ETE	229
5.3.1 SYNERGIES ET CONFLITS ENTRE POINTS DE VUE PRIVE ET SOCIETAL	229
5.3.2 REDUCTION DES CONSOMMATIONS D'ENERGIE LIEES AU CONFORT D'ETE, UNE ANALYSE COUT-EFFICACITE	236
5.3.3 PERSPECTIVE D'EVOLUTION DES RESULTATS DE L'ACB SOCIETALE A L'HORIZON 2050	241
5.4 ELEMENTS DE PROSPECTIVE QUANT AUX CONSOMMATIONS ENERGETIQUES ET AUX EMISSIONS DE GES LIEES A LA CLIMATISATION INDIVIDUELLE EN FRANCE	245
5.4.1 DETERMINATION D'UN SCENARIO TENDANCIEL POUR LA FRANCE	245
5.4.2 POTENTIEL DE REDUCTION DES CONSOMMATIONS A L'ECHELLE DU TERRITOIRE	252
5.4.3 LA CONTRIBUTION DU CONFORT D'ETE DANS LES SCENARIOS FACTEUR 4	255
5.5 ENSEIGNEMENTS ET RECOMMANDATIONS TIRES DU PRESENT CHAPITRE	257
5.5.1 RESULTATS DE L'ANALYSE COUT-BENEFICE D' ACTIONS D'AMELIORATION DU CONFORT D'ETE A L'ECHELLE DU BATIMENT	257
5.5.2 QUANTIFICATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX LIES A LA CLIMATISATION INDIVIDUELLE	258
5.5.3 RECOMMANDATIONS	260

CONCLUSION GENERALE	265
RETOUR SUR LE TRAVAIL REALISE DANS LE CADRE DE CETTE THESE	267
ELEMENTS DE PERSPECTIVE	268
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	271
CHAPITRE 1	273
CHAPITRE 2	275
CHAPITRE 3	280
CHAPITRE 4	283
CHAPITRE 5	285
ANNEXES	289
TABLE DES MATIERES	291
ANNEXE 1. « ENVIRONMENTAL IMPACT AND DISCOMFORT RELIEF OF SUMMER COMFORT APPLIANCES »	293
ANNEXE 2. SCENARIOS (OCCUPATION, VENTILATION, EQUIPEMENTS) UTILISES POUR LES PIECES DE REFERENCE DU CHAPITRE 3	301
ANNEXE 3. PRESENTATION DES MODELES DE CLIMATISEUR UTILISES DANS LE CHAPITRE 4	303
ANNEXE 4. « STRATEGIES FOR REDUCING ENVIRONMENTAL IMPACTS OF ROOM AIR CONDITIONERS IN EUROPE »	305

Chapitre 1. Formulation des objectifs du travail de thèse et développement d'une méthodologie

Table des matières

<u>CHAPITRE 1. FORMULATION DES OBJECTIFS DU TRAVAIL DE THESE ET DEVELOPPEMENT D'UNE METHODOLOGIE</u>	7
TABLE DES MATIERES	9
INTRODUCTION	11
1.1 LA PROBLEMATIQUE DE LA CLIMATISATION INDIVIDUELLE DANS LES CONTEXTES EUROPEEN ET FRANÇAIS	13
1.1.1 DESCRIPTION DES APPAREILS DE CLIMATISATION INDIVIDUELLE	13
1.1.2 UNE AUGMENTATION STRUCTURELLE DE L'USAGE DE LA CLIMATISATION INDIVIDUELLE	14
1.1.3 DES IMPACTS ENERGETIQUES ET ENVIRONNEMENTAUX IMPORTANTS	18
1.1.4 PANORAMA DE SOLUTIONS PERMETTANT DE REDUIRE LES IMPACTS LIES A L'USAGE DE LA CLIMATISATION INDIVIDUELLE	19
1.1.5 CONTEXTE REGLEMENTAIRE CONCERNANT LA REDUCTION DES IMPACTS LIES AU CONFORT D'ETE INDIVIDUEL	20
1.1.6 CONCLUSIONS	22
1.2 L'EVALUATION DES PROGRAMMES D'ECONOMIES D'ENERGIE	23
1.2.1 TERMINOLOGIE ADOPTEE	23
1.2.2 L'EVALUATION DES ECONOMIES D'ENERGIE ENGENDREES PAR LES PROGRAMMES DE MDE	24
1.2.3 EVALUATION DE L'EFFICIENCE ECONOMIQUE DES PROGRAMMES DE MDE	25
1.2.4 CONCLUSIONS	29
1.3 FORMULATION DES OBJECTIFS ET DEVELOPPEMENT D'UNE METHODOLOGIE	30
1.3.1 FORMULATION DES OBJECTIFS	30
1.3.2 PRISE EN COMPTE DES SPECIFICITES LIEES A L'EVALUATION D' ACTIONS DE MDE RELATIVES AU CONFORT D'ETE	30
1.3.3 CONCLUSION : METHODOLOGIE DEVELOPPEE	32

Introduction

Le monde de l'énergie se doit de relever des défis considérables que sont notamment la lutte contre les changements climatiques et la raréfaction des réserves d'énergies conventionnelles face à une demande mondiale toujours tirée à la hausse.

Dans ce contexte, le bâtiment est considéré comme un secteur économique clé. Fortement consommateur d'énergie¹ et émetteur de gaz à effet de serre², il est à ce titre un passage obligé vers un monde plus économe en énergie et moins carboné. De plus, le secteur du bâtiment présente un important potentiel de réduction des consommations et des émissions, notamment dû à l'existence de solutions techniques, nombreuses, variées, et matures. Le faible taux de renouvellement du parc³ impose de s'attaquer à la fois aux bâtiments neufs et au parc existant où les leviers d'action sont plus limités. Il suppose également que les choix réalisés dans le secteur du bâtiment ont des conséquences sur le long terme.

Des progrès significatifs ont déjà été réalisés et la consommation énergétique unitaire moyenne de chauffage dans les logements s'est ainsi vue diminuer de 44 % entre 1973 et 2001 (ADEME, 2003). Ces résultats sont cependant à relativiser du fait de l'accroissement du parc de bâtiments, de l'augmentation de la surface moyenne occupée, d'une recherche accrue de confort, et de la hausse des consommations d'électricité spécifique (télécommunications, informatique...). La consommation unitaire moyenne des usages spécifiques de l'électricité⁴ a ainsi progressé de 89 %, entre 1973 et 2001 (ADEME, 2003). A l'échelle nationale, l'influence contradictoire de ces phénomènes se traduit par une augmentation annuelle de la consommation d'énergie finale associée au secteur du bâtiment d'environ 1 %⁵.

Une grande incertitude concerne la diffusion de la climatisation individuelle (c'est-à-dire pièce par pièce) et son impact sur les consommations d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre. En effet, si cet usage est actuellement marginal en France et en Europe, l'exemple de la climatisation dans le secteur automobile a montré que sa généralisation était tout à fait envisageable. D'autre part, l'incertitude concernant la diffusion de la climatisation individuelle est accentuée par le phénomène du changement climatique : si les étés exceptionnels, tel que celui de 2003, devenaient la norme dans les prochaines décennies, alors la diffusion de la climatisation individuelle s'en trouverait très probablement amplifiée.

¹ 43 % de l'énergie finale totale en France, dont 2/3 pour le chauffage.

² 25 % des émissions française.

³ De l'ordre de 100 ans pour le résidentiel.

⁴ Hors chauffage électrique donc.

⁵ Plus précisément de 42 % entre 1970 et 2007 (IFEN, 2009).

1.1 La problématique de la climatisation individuelle dans les contextes européen et français

1.1.1 Description des appareils de climatisation individuelle

Dans le secteur de la climatisation, le terme « individuel » s'utilise par opposition aux systèmes centralisés qui sont composés d'une unité de production de froid et d'un fluide pour distribuer l'énergie frigorifique aux différents endroits climatisés alors que les appareils de climatisation individuelle sont uniquement utilisés pour le refroidissement de la pièce dans laquelle ils sont installés. A l'instar de la Commission Européenne (2002) et du syndicat de fabricants Eurovent (2006), la valeur de 12 kW de puissance frigorifique est généralement retenue comme frontière entre ces deux types de climatisation.

Les différents types de climatiseurs individuels fonctionnent tous sur le principe du cycle frigorifique. Un fluide frigorigène liquide entre en ébullition et s'évapore en absorbant la chaleur du fluide extérieur (l'air intérieur dans notre cas). Ce gaz (à basse pression et à basse température) est ensuite aspiré par le compresseur, ce qui va permettre d'élever sa pression et sa température. Après coup, ce gaz chaud cède sa chaleur au fluide extérieur dans le condenseur jusqu'à redevenir liquide. La différence de pression entre le condenseur et l'évaporateur nécessite d'insérer un détendeur (qui abaisse la pression) dans le circuit.

Il existe quatre principaux types de climatiseurs individuels. Le climatiseur de type « split » (Figure 1.1) est constitué de deux éléments séparés, reliés par un tube où circule le fluide frigorigène. L'unité intérieure comprend un ventilateur, un évaporateur, des filtres à air ainsi que le dispositif de commande. L'unité extérieure renferme quant à elle le compresseur et le condenseur. Les climatiseurs de type « multi-split » (Figure 1.2) sont construits de façon identique mais sont composés de plusieurs unités intérieures (ce qui permet de climatiser plusieurs pièces). Les climatiseurs « fenêtres » (Figure 1.3) sont des climatiseurs monoblocs s'encastrant dans une paroi extérieure. Comme pour les appareils de type « split », l'évaporateur et son ventilateur sont à l'intérieur, le compresseur et le condenseur à l'extérieur. Enfin, les principaux climatiseurs mobiles sont de type « single duct » (Figure 1.4). Ces unités, dont le condenseur est raccordé à une gaine d'extraction, rejettent à l'extérieur l'air pris dans la pièce puis réchauffé au condenseur.

Les modèles de type « split » constituent la grande majorité des ventes en Europe : 78 % selon BSRIA (2005). Les « multi-split » et les appareils mobiles représentent chacun 10 % de ces ventes alors que les appareils de type « fenêtre » ne forment qu'une très faible part du marché (2 %).

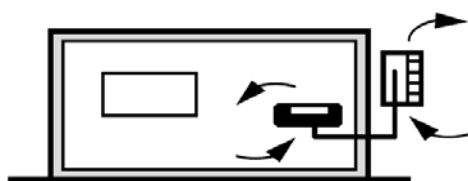


Figure 1.1. Répartition schématique d'un système « Split » (Orphelin, 1999)

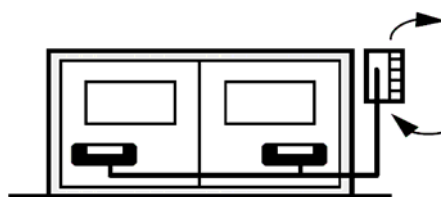


Figure 1.2. Répartition schématique d'un système « Multi-Split » (Orphelin, 1999)

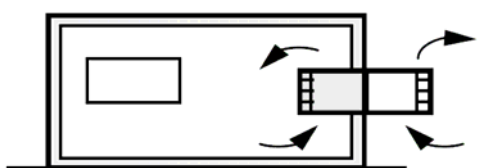


Figure 1.3. Répartition schématique d'un climatiseur fenêtre (Orphelin, 1999)

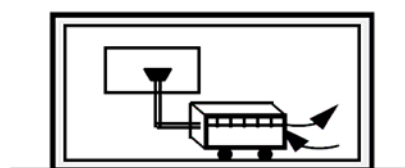


Figure 1.4. Répartition schématique d'un climatiseur « Single Duct » (Orphelin, 1999)

Enfin, il est important de noter que ces appareils peuvent être à refroidissement seul ou réversibles. Dans la majorité des cas, les climatiseurs réversibles opèrent comme des pompes à chaleur (les sources chaudes et froides sont inversées dans la description précédente), mais certains sont simplement équipés d'une résistance électrique. La Figure 1.5 montre la part de climatiseurs réversibles parmi les ventes de « split » ou « multi-split » dans 10 pays européens. Celle-ci dépasse les 40 % dans tous les pays étudiés excepté l'Allemagne.

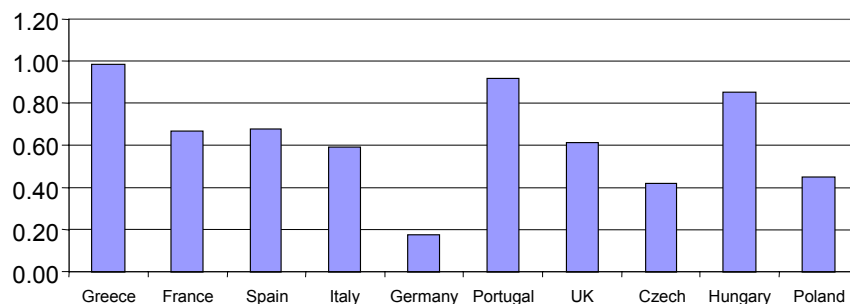


Figure 1.5. Proportion de ventes des split et multi split réversibles (en nombre d'unités extérieures) pour 10 pays européens (Rivière et al., 2009)

1.1.2 Une augmentation structurelle de l'usage de la climatisation individuelle

1.1.2.1. Les situations européenne et française

Le marché européen

La climatisation individuelle est un besoin relativement récent en Europe mais en très forte augmentation : environ 3,5 millions d'unités ont été vendues en 2005 contre 1,6 millions en 1996 (120 % d'augmentation en 10 ans).

En Europe, le taux de pénétration de la climatisation reste très faible par rapport à d'autres régions. Dans le secteur résidentiel par exemple, il est estimé à environ 5 %, contre 85 % au Japon et 65 % aux États-Unis.

L'Italie, l'Espagne et la Grèce représentent à eux seuls 67 % du marché européen, la France avec 7 % se positionne derrière ces trois pays (Figure 1.6).

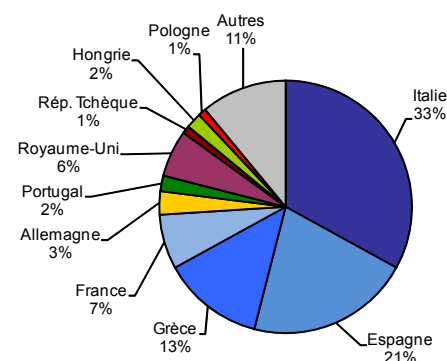


Figure 1.6. Répartition nationale des ventes de climatiseurs individuels en Europe (BSRIA, 2009)

Le marché français

La Figure 1.7 présente l'évolution des ventes de climatiseurs individuels (de puissance inférieure à 17,5 kW) entre 1998 et 2006. Ce marché est en forte croissance, puisqu'en l'espace de 8 ans, les ventes ont augmenté de 170 %, avec notamment une croissance très importante des climatiseurs mobiles (65 %) et Split (220 %).

Suite à l'été caniculaire de 2003, les ventes ont exceptionnellement augmenté de 50 % entre 2002 et 2003, puis de nouveau de 50 % entre 2003 et 2004. Une autre évolution importante de ces dernières années, est la poussée des équipements réversibles qui constituaient, en 2006, 91 % des ventes de systèmes Split (Clim'Info, 2007).

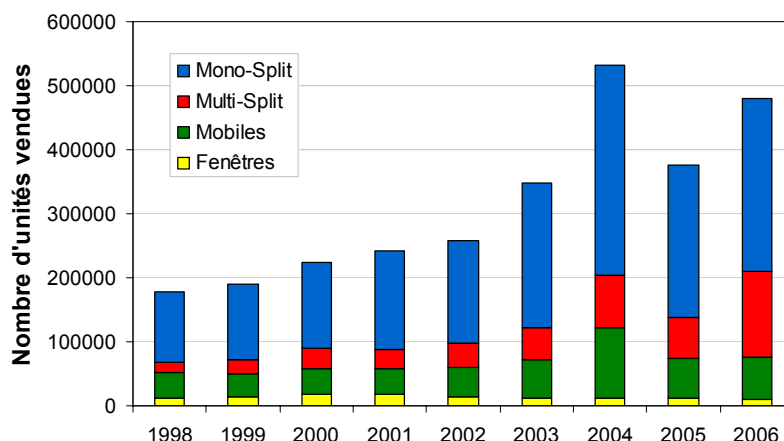


Figure 1.7. Evolution des ventes de climatiseurs individuels de puissance inférieure à 17,5 kW (chiffres Clim'Info)

Rivière et *al.* (2009) donnent la répartition des ventes et du stock de climatiseurs individuels en fonction de différents types de bâtiment (Tableau 1.1). La climatisation individuelle est principalement employée dans les bureaux, puis en proportion similaire dans les commerces et les résidences. Cette part importante du secteur résidentiel est due aux climatiseurs mobiles, celui-ci ne représente en effet qu'environ 10 % du stock et des ventes de systèmes fixes.

Tableau 1.1. Répartition des ventes et du stock de climatiseurs individuels en 2005 en fonction de différents types de bâtiment (Rivière et *al.*, 2009)

	Appareils	Résidences	Bureaux	Commerces
Stock [kW frigorigique]	Mobiles	2 260 694	296 043	134 565
	Split réversibles	1 173 041	6 817 095	3 601 031
	Split à refroidissement seul	396 145	2 302 188	1 216 097
	Total	21 %	52 %	27 %
Ventes [kW frigorigique]	Mobile	178 265	23 344	19 924
	Split réversibles	171 382	995 982	526 113
	Split à refroidissement seul	26 711	155 229	81 998
	Total	17 %	54 %	29 %

1.1.2.2. Les principaux déterminants de l'augmentation des ventes de climatisation individuelle

Des appareils vendus à des prix de plus en plus abordables

Concernant les climatiseurs individuels, un véritable marché de masse s'est développé en Europe. La majorité des produits est fabriquée en Chine (environ 85 %⁶) puis vendue à bas prix en Europe. Les climatiseurs ont vu leur prix de vente se réduire significativement. A titre d'exemple, Adnot et *al.* (1999) estimaient le prix d'un appareil mobile de type « single duct » à 385 €₁₉₉₈/kW (frigorigique) soit environ 459 €₂₀₀₈, dix ans plus tard, Rivière et *al.* (2009) ne l'estiment plus qu'à 177 €₂₀₀₈/kW.

Des appareils dotés d'une fonctionnalité chauffage

Dans le contexte français, l'utilisation des appareils en mode chauffage contribue à l'augmentation des ventes. Ainsi, Clim'Info (2006) explique que la fonction « chauffage » bouleverse la saisonnalité des

⁶ Selon Koizumi (2006), 12 % des climatiseurs produits en Chine pour l'exportation (environ 28 million d'unités en 2005 et 2006) sont destinés à l'Europe, soit 3 million d'unités en 2005 et 2006.

ventes et que celles des mois de septembre à décembre représentaient 30 % du volume annuel en 2005. Ce mode de chauffage bénéficiait d'ailleurs d'un crédit d'impôt jusqu'en 2009, date à laquelle la loi de finance a limité l'assiette de ce dernier, s'agissant des dépenses d'acquisition des pompes à chaleur, aux pompes à chaleur « autres que air/air ». Une fois installées, les pompes à chaleur air/air réversibles sont très susceptibles d'être utilisées en climatisation. C'est une des raisons qui a motivé l'exclusion des pompes à chaleur air/air du système de crédit d'impôt français. Le rapport en première lecture de l'Assemblée Nationale (2008) suite au projet de loi de finance 2009 mentionne en effet que celles-ci « sont facilement réversibles et souvent utilisées pour la climatisation des logements ».

Une augmentation des attentes en matière de confort thermique

Les attentes des occupants en termes de confort, et plus particulièrement de confort thermique, s'accroissent. A l'image du secteur automobile où elle s'est imposée⁷, la climatisation dans les bâtiments pourrait devenir en Europe un service ordinaire au même titre que le chauffage ou l'éclairage. C'est d'ailleurs en grande partie déjà le cas dans les bureaux et les magasins.

Conception et usage des bâtiments

Les pratiques de conception usuelles sont parfois à l'origine d'une augmentation des besoins de refroidissement dans les bâtiments. La multiplication des surfaces vitrées, l'impossibilité d'ouvrir les fenêtres, ou encore une inertie faible, sont par exemples des facteurs fortement susceptibles d'entraîner l'installation de systèmes de climatisation. D'autre part, le fort développement de l'usage d'équipements électriques (bureautique et éclairage notamment) a contribué à l'augmentation des apports internes et donc des besoins de refroidissement. Enfin, une isolation renforcée des bâtiments (nécessaire pour réduire les consommations de chauffage) peut piéger les apports de chaleur intérieurs et extérieurs, provoquant une détérioration importante de l'inconfort estival (Feldmann et Schwarzberg, 2009).

L'effet d'îlot de chaleur urbain

La température de l'air dans des secteurs urbains denses est sensiblement plus élevée qu'aux alentours. Adnot et *al.* (2004) rappellent que ce phénomène microclimatique, connu sous le nom « d'effet d'îlot thermique », est principalement dû :

- au manque d'arbre et de végétation (ce qui diminue l'évapotranspiration et assèche l'air urbain),
- à l'utilisation de surfaces peu réfléchissantes pour les toits et les trottoirs qui absorbent et stockent l'énergie solaire,
- à la chaleur anthropogénique libérée par la combustion des carburants et des combustibles des sources fixes ou mobiles d'énergie et du métabolisme humain,
- à l'effet de serre engendrée par l'atmosphère urbaine polluée.

Le profil de température tracé sur la Figure 1.8 représente le phénomène d'îlot urbain et met en évidence les différences de température entre les milieux urbain et rural. En France, différentes études ont été menées afin d'évaluer cet effet dans plusieurs villes. Dubreuil et *al.* (2008) notent qu'en juillet 2006, à Rennes, la température de nuit (22h – 5h) mesurée en centre ville a été en moyenne plus élevée de 2,5 °C par rapport à la campagne environnante. En revanche, pendant la journée, les écarts moyens horaires ne dépassent pas quelques dixièmes de degrés. A Paris, sur la période 1990-1999, l'écart moyen de température nocturne entre centre ville et campagne était de l'ordre de 3,3 °C mais a oscillé entre 1 et 6 °C⁸ (Cantat, 2004). Selon l'auteur, le contraste de température était surtout marqué la nuit en été.

⁷ Selon Barbusse et Gagnepain (2003), le taux d'équipement en climatisation des véhicules neufs vendus en France a cru de moins de 15 % en 1995 à plus de 60 % en 2000.

⁸ Il arrive cependant qu'il soit beaucoup plus important comme le 5 octobre 1997 au matin où on a relevé 12,9 °C en centre-ville alors que, sur la campagne environnante, cette température descendait fréquemment en-dessous de 4°C.

Le phénomène d'îlot urbain en été contribue donc à augmenter la demande de climatisation.

Ceci constitue un cercle vicieux car l'augmentation de l'utilisation de climatisation contribue elle-même au phénomène en rejetant notamment de l'air chaud au condenseur. A titre d'exemple, Yuangao et Zhiwei (2008) ont ainsi évalué que dans la ville de Wuhan⁹ (en Chine), les climatiseurs domestiques étaient à l'origine d'une augmentation de la température de 2,56 °C en atmosphère stable (vents faibles) et de 0,2 °C en atmosphère instable (vents élevés).

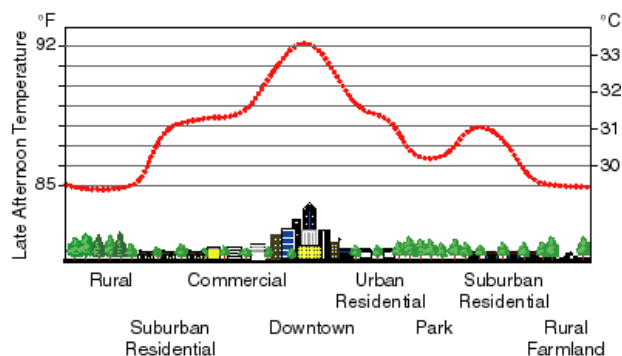


Figure 1.8. Représentation du phénomène d'îlot urbain : profil type de température (HIG, 2009)

Canicules et changement climatique

Les été exceptionnels, tels que la canicule de 2003, déclenchent un marché de masse et contribuent fortement à augmenter le taux de pénétration de la climatisation. Ceci est particulièrement vrai dans les pays comme la France où l'achat d'un climatiseur individuel relève souvent plus d'une impulsion que d'un choix planifié. Les ventes ont ainsi augmenté de 50 % entre 2002 et 2003, puis de nouveau de 50 % entre 2003 et 2004.

Le GIEC (2007) envisage une dérive climatique variant d'ici 2100 de 1,1 °C à 6,4 °C selon les scénarios d'émission et les modèles climatiques utilisés. La Figure 1.9 présente les résultats de Dusfrene et *al.* (2006) concernant l'évolution de la température moyenne estivale en France métropolitaine. Ces résultats ont été obtenus avec deux modèles de simulation climatique en s'appuyant sur deux des scénarii définis par le GIEC (A2¹⁰ et B1¹¹). Les observations de température sont aussi mentionnées, elles font clairement ressortir le côté exceptionnel de l'été 2003. Dans le scénario A2, la température moyenne des étés croît fortement, et, à la fin du siècle, la température de tous les étés simulés dépasse celle de l'été 2003. Concernant le scénario B1, si la température des étés augmente plus faiblement, un été de type 2003 n'est plus exceptionnel en 2100.

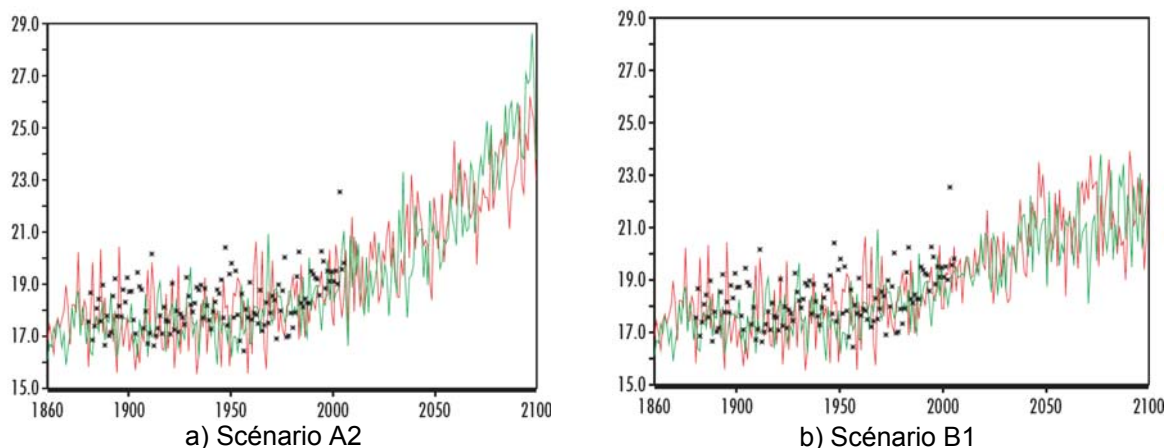


Figure 1.9. Evolution de la température moyenne (°C) durant les trois mois d'été (juin à août) en France métropolitaine ; observée (étoiles noires), et simulée par les modèles du CNRM (en rouge) et de l'IPSL (en vert).

⁹ Dans cette ville, la température moyenne journalière dépasse 35 °C pendant 21 jours par an.

¹⁰ Sans rentrer dans les détails, le scénario A2 suppose que la population mondiale croisse jusqu'à 15 milliards d'individus en 2100, la croissance économique et la pénétration de nouvelles technologies énergétiquement efficaces sont très hétérogènes selon les régions...

¹¹ Sans rentrer dans les détails, le scénario B1 suppose que la population mondiale culmine à 9 milliards d'individus en 2050 puis décroît, les nouvelles technologies énergétiquement efficaces sont massivement utilisées, l'économie est dominée par les services et les technologies de l'information...

Ces résultats illustrent comment les effets d'un changement climatique global seraient susceptibles de se traduire à l'échelle régionale. La canicule de 2003 pourrait devenir la norme en France dans quelques décennies, ce qui s'accompagnerait d'un développement massif de la climatisation.

1.1.3 Des impacts énergétiques et environnementaux importants

1.1.3.1. L'augmentation des consommations d'électricité

La consommation d'électricité due aux climatiseurs individuels a été évaluée par Rivière et *al.* (2009) à 22 TWh en 2005 contre 3 TWh en 1990 (mode chauffage non compris), soit une augmentation d'environ 630 % en l'espace de 15 ans. Cette consommation représentait en 2005 de l'ordre de 0,8 % de la quantité d'énergie électrique appelée pour l'ensemble de l'Europe des 25. La prise en compte du fonctionnement de ces appareils en mode chauffage conduisait à des consommations de 9 TWh en 1990 et de 64 TWh en 2005.

La consommation d'énergie est à l'origine de préoccupations importantes et bien connues : impacts environnementaux accidentels et systématiques, épuisement des ressources, augmentation de la dépendance énergétique... La réduction des consommations énergétiques constitue aujourd'hui un enjeu mondial majeur et, dans ce contexte, il apparaît essentiel de contrôler les consommations d'électricité liées à l'usage de la climatisation individuelle qui, si elles restent marginales, ont spectaculairement augmentées ces dernières années.

1.1.3.2. L'augmentation des émissions directes et indirectes de Gaz à Effet de Serre (GES)

L'usage des climatiseurs individuels engendre des émissions de GES directes et indirectes. Les émissions indirectes sont liées à l'emploi de certaines centrales thermiques (charbon, gaz, fuel) nécessaires à la production d'électricité. Les émissions directes sont dues aux fluides frigorigènes qui sont utilisés dans les appareils de climatisation et qui ont pour certains un fort Pouvoir Radiatif Global¹² (PRG). Ces émissions directes dépendent du pouvoir radiatif du fluide, de la charge de fluide, du taux de fuite pendant la durée de vie ainsi que du taux de récupération du fluide en fin de vie.

Adnot et *al.* (1999) ont établi un scénario d'émissions de GES dues aux climatiseurs individuels montrant une multiplication des émissions directes et indirectes d'un facteur 20 entre 1990 et 2010. En 2010, ces émissions correspondraient à une augmentation des émissions totales européennes d'environ 0,37 %, une valeur significative au vu de l'objectif de réduction de 8 % adopté dans le cadre du Protocole de Kyoto.

D'autre part, l'utilisation massive d'appareils de climatisation aux heures les plus chaudes peut provoquer des appels de pointe de puissance électrique. Le contenu en carbone du kilowattheure de pointe étant souvent très élevé en raison d'un appel important à la production d'électricité d'origine thermique, ceci contribue à augmenter les émissions de GES provoquées par l'usage de la climatisation.

Ainsi, dans un contexte de lutte contre les émissions de GES, il apparaît nécessaire de réduire celles causées par l'usage de la climatisation individuelle.

1.1.3.3. La fragilisation des réseaux électriques

L'utilisation massive d'appareils de climatisation aux heures les plus chaudes provoque des appels de pointe de puissance électrique pouvant occasionner des problèmes de production, de transport et de distribution d'électricité à des périodes où les réseaux sont particulièrement fragiles¹³.

¹² Les fluides R410A et R407C qui sont actuellement les plus répandus dans le secteur de la climatisation individuelle ont des PRG respectivement égaux à 1730 et 1430.

¹³ Le refroidissement des centrales est par exemple plus difficile.

Le journal Energie Plus (2003) rapportait qu'une partie des consommateurs italiens s'était retrouvée sans électricité pendant la journée du 26 juin 2003. Cette coupure a été causée par une croissance extrêmement rapide de la demande de climatisation¹⁴, conjuguée à une réduction de la capacité de production des grandes centrales en raison d'un manque d'eau de refroidissement. Selon Energie Plus, l'explication de ce « black out » réside dans le fait que l'Italie n'a pas pris de mesures suffisantes de maîtrise de la demande d'électricité et n'a imposé aucune norme d'efficacité aux climatiseurs, tandis que l'ENEL¹⁵ poursuivait une promotion active de l'air conditionné.

En France, selon l'ADEME et le CSTB (2004), l'appel de puissance lié à l'usage de la climatisation était estimé, en 2000, entre 250 à 300 MW par degré Celsius d'augmentation de la température moyenne journalière au-dessus de 25 °C. Avec une généralisation de la climatisation, cette sensibilité au climat pourrait augmenter de façon importante, ce qui fragiliserait les réseaux lors des heures les plus chaudes.

1.1.4 Panorama de solutions permettant de réduire les impacts liés à l'usage de la climatisation individuelle

1.1.4.1. Amélioration de l'enveloppe des bâtiments

Il existe de nombreuses solutions d'enveloppe permettant de limiter les besoins de refroidissement : installation de protections solaires, réduction des surfaces vitrées, utilisation de peintures réfléchissantes...

Il s'agit essentiellement de réduire les apports de chaleur extérieure dus à :

- la pénétration directe du soleil par les surfaces vitrées,
- la pénétration indirecte par les murs et la toiture,
- la pénétration de l'air extérieur par les ouvertures et infiltrations, lorsque celui-ci est plus chaud que l'air intérieur.

1.1.4.2. Usage du bâtiment et comportement des occupants

L'usage du bâtiment et le comportement des occupants ont des conséquences importantes en termes de besoins de refroidissement et de confort estival. En effet, certains moyens d'adaptation permettent aux occupants d'étendre la plage de conditions climatiques dans laquelle ils se sentent confortables (vêtements plus légers, création de courants d'air par l'ouverture de fenêtres...) et, à ce titre, d'augmenter la température de consigne ou d'éviter le recours à la climatisation.

A titre d'illustration, le gouvernement japonais a lancé en 2005 le programme « Cool Biz » qui consiste à inciter les hommes d'affaire japonais à adopter des codes vestimentaires moins stricts (sans cravate...) afin de réduire de quelques degrés la consigne de climatisation dans les bureaux (CLER, 2005). Un autre exemple de bonne pratique consiste à choisir des appareils de bureautique ou d'électroménager économes en énergie car ceux-ci produisent moins de chaleur lors de leur fonctionnement et diminuent ainsi les besoins de refroidissement et l'inconfort estival.

1.1.4.3. Réduction des impacts environnementaux des climatiseurs

Amélioration de l'efficacité énergétique

Adnot et *al.* (1999) puis Rivière et *al.* (2009) ont montré que les performances énergétiques des climatiseurs individuels européens étaient disparates et, pour une grande part, inférieures aux niveaux minimaux exigés dans plusieurs autres pays tel que le Japon ou l'Australie. Il existe donc des possibilités de réduction majeures des consommations d'énergie par l'utilisation d'appareils plus performants en termes d'efficacité énergétique.

¹⁴ Notamment individuelle selon Pagliano et *al.* (2008).

¹⁵ ENEL, Ente Nazionale per l'Energia Elettrica, est la société nationale italienne d'électricité, principal producteur d'énergie électrique du pays.

Les fluides frigorigènes

L'impact des gaz frigorigènes sur l'environnement se caractérise par :

- leur potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone (PDO),
- leur potentiel de réchauffement planétaire (PRG, Pouvoir de Réchauffement Global),
- leur toxicité,
- et leur inflammabilité.

La réduction des impacts environnementaux des climatiseurs passe par l'utilisation de fluides adaptés. Un gaz frigorigène idéal aurait un PDO nul, un faible PRG et une absence de toxicité et d'inflammabilité, tout en permettant une bonne efficacité énergétique des appareils afin de réduire les impacts indirects.

1.1.4.4. Utilisation de systèmes de rafraîchissement sans compression

Les systèmes de rafraîchissement sans compression mécanique peuvent être divisés en deux catégories : les systèmes actifs qui consomment de l'énergie (sur-ventilation mécanique, climatisation par dessiccation, ventilateur de plafond...) et les systèmes passifs qui n'en consomment pas (la ventilation naturelle notamment).

Ces systèmes ont généralement des impacts environnementaux plus faibles que ceux des appareils de climatisation (faible consommation d'énergie, absence de fluide frigorigène) mais ont l'inconvénient d'avoir une capacité de refroidissement limitée et pas toujours concomitante avec les besoins de froid du bâtiment. Aussi, ne permettent-ils pas toujours d'obtenir un confort total¹⁶ comme le permettrait une climatisation bien dimensionnée.

1.1.5 Contexte réglementaire concernant la réduction des impacts liés au confort d'été individuel

1.1.5.1. Réglementations concernant les appareils de climatisation

Dans le but d'améliorer l'efficacité énergétique des climatiseurs, un étiquetage énergétique a été mis en place en Europe (CE, 2002) et les produits sont maintenant notés de A à G en fonction de leur efficacité énergétique. Contrairement à la mise en place de seuils de performances minimales (Japon, Australie...), l'étiquetage fonctionne de manière incitative et ne peut empêcher l'achat par les consommateurs de produits peu performants.

Concernant les fluides frigorigènes, ceux qui sont contenus dans les appareils vendus actuellement n'ont plus d'impact sur la couche d'ozone. En revanche, leur pouvoir radiatif reste très important et la Commission Européenne a dû s'attaquer à ce problème au moyen de la directive F-gas (CE, 2006). Cette dernière concerne la limitation des fuites de fluides frigorigènes et l'interdiction progressive de l'utilisation de certains (mais pas ceux actuellement utilisés en climatisation individuelle) dans le but de réduire les émissions de gaz à effet de serre. Elle pose notamment des exigences en termes de :

- confinement (contrôles de fuites obligatoires et réguliers par des organismes certifiés pour les appareils avec plus de 3 kg de fluide),
- récupération (des mesures de récupération des gaz à effet de serre par du personnel certifié doivent être mises en place afin d'en assurer le recyclage, la régénération ou la destruction),
- formation et certification des opérateurs,
- étiquetage (les produits vendus en Europe doivent être accompagnés d'un étiquetage précisant le fluide utilisé, la quantité de fluide et l'impact de celui-ci sur l'effet de serre).

1.1.5.2. Réglementations thermiques concernant les bâtiments

Les réglementations thermiques nationales européennes sont très hétérogènes à la fois en termes d'exigences mais aussi en termes d'approche et de méthodes de calcul. Dès lors, l'étude de ces réglementations est un travail lourd et complexe et seul le cas français est abordé ici.

¹⁶ Le maintien de conditions climatiques intérieures constantes quelles soient les conditions extérieures.

Bâtiments neufs (Réglementation Thermique 2005)

Selon la Réglementation Thermique 2005, un bâtiment à construire doit respecter des exigences concernant sa consommation d'énergie, ses composants et le confort thermique estival.

- Exigences liées aux consommations d'énergie

La consommation annuelle prévisionnelle d'énergie se doit d'être inférieure à la consommation conventionnelle de référence. Celle-ci correspond à la consommation qu'aurait ce même bâtiment pour des performances imposées aux matériaux et aux équipements qui le composent. Elle dépend notamment du type de bâtiment et du climat. La réglementation laisse au concepteur la possibilité d'utiliser certains équipements ou matériaux de performance inférieure à la référence¹⁷, sous réserve que d'autres soient plus performants et que la consommation totale soit inférieure à la valeur exigée.

En ce qui concerne le confort d'été, deux catégories de locaux se distinguent :

- les locaux, dits de catégorie CE1, pour lesquels les consommations de référence liées au refroidissement sont nulles¹⁸,
- les autres locaux, dits de catégorie CE2, pour lesquelles les consommations de référence liées au refroidissement sont non nulles (hôpitaux, bureaux en zones bruyantes...).

- Exigences liées au confort thermique d'été

Les locaux de type CE1 sont soumis à une exigence de confort d'été. La température intérieure maximale atteinte en été doit en effet être inférieure à la température de référence. Cette température est calculée pour ce même bâtiment avec des performances imposées aux matériaux et aux équipements qui le composent (facteurs solaires des vitrages, ventilation...). Cette exigence vise à éviter le recours à des climatiseurs une fois le bâtiment construit.

- Exigences liées aux performances des composants du bâtiment (« garde-fous »)

Des performances minimales sont requises pour une série de composants (isolation, ventilation, système de chauffage...). En ce qui concerne le confort d'été et la climatisation, il est notamment exigé que :

- le facteur solaire des baies soit inférieur ou égal au facteur solaire de référence,
- les baies d'un même local autre qu'à occupation passagère et de catégorie CE1 puissent s'ouvrir sur au moins 30 % de leur surface totale (sauf si les règles d'hygiène ou de sécurité l'interdisent),
- les locaux refroidis, dans le cas de bâtiments à usage autre que d'habitation, doivent être pourvus de dispositifs spécifiques de ventilation,
- les portes d'accès à une zone refroidie à usage autre que d'habitation doivent être équipées d'un dispositif assurant leur fermeture après passage.

Bâtiments existants

Concernant les bâtiments existants, la réglementation thermique à appliquer diffère selon les caractéristiques du bâtiment en termes de surface, de coûts des travaux de rénovation thermique entrepris et de l'année de construction (Figure 1.10).

Les principes de la réglementation thermique « globale » sont similaires à ceux de la RT 2005 pour les bâtiments neufs et l'on retrouve les exigences précédemment mentionnées à propos du confort d'été.

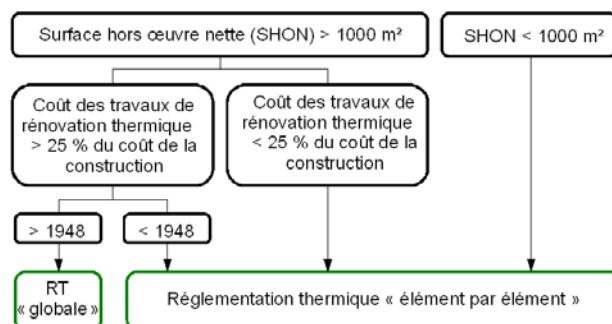


Figure 1.10. Champ d'application des réglementations thermiques pour les bâtiments existants

¹⁷ Dans la limite des garde-fous présentés par la suite.

¹⁸ L'installation d'une climatisation nécessitera d'être plus performants que la référence sur d'autres usages.

Le principe de la réglementation thermique « par élément » (RF, 2007) diffère. Celle-ci spécifie des exigences pour chaque élément susceptible d'être installé ou changé (fenêtres, appareils de chauffage...). En ce qui concerne le confort d'été, elle exige notamment :

- le maintien ou le remplacement des protections solaires existantes et l'installation des protections solaires pour les baies non orientées au Nord (sauf exception : règles d'urbanisme...),
- l'obligation d'installer des protections solaires mobiles extérieures pour les fenêtres de toit,
- que les climatiseurs de puissance frigorifique inférieure ou égale à 12 kW installés soient au moins de classe B (étiquetage énergétique européen)¹⁹.

Le confort d'été est abordé dans les réglementations thermiques françaises. Dans le parc existant, elles se limitent à interdire les climatiseurs inefficaces et à équiper les parois vitrées de protections solaires. Dans le parc neuf, l'exigence portant sur la température maximale atteinte en été devrait théoriquement permettre d'éviter le recours à des climatiseurs une fois le bâtiment construit (à condition que le calcul réglementaire de cette dernière soit représentatif de la réalité sur le terrain).

1.1.6 Conclusions

Si la climatisation individuelle reste marginale en France, les ventes d'appareils lors des dernières canicules et l'exemple de la climatisation dans l'automobile ont montré que sa généralisation était tout à fait envisageable. Susceptible d'être accentué par le changement climatique, ce poste de consommation pourrait à terme faire augmenter significativement les consommations d'électricité, les émissions de GES et fragiliser les réseaux électriques.

Des solutions existent pour concilier le besoin de confort d'été et la nécessaire réduction des impacts de la climatisation : amélioration des équipements, meilleure conception du bâtiment, usage du bâtiment... La mise en place de ces solutions d'efficacité et de sobriété énergétique permettrait d'éviter une généralisation importante de systèmes de climatisation peu efficaces.

¹⁹ Cette disposition ne s'applique qu'aux bâtiments achevés depuis plus de 5 ans.

1.2 L'évaluation des programmes d'économies d'énergie

1.2.1 Terminologie adoptée

1.2.1.1. De l'énergie primaire au service énergétique

L'obtention par l'utilisateur d'un bien ou d'un service requérant de l'énergie (confort, mobilité...) est nommée « service énergétique ». Celui-ci est souvent mesuré par une grandeur physique (le Lux par exemple) et non en quantité d'énergie.

Avant de pouvoir être utilisée par l'utilisateur, l'énergie doit être transformée et transportée. La chaîne énergétique reliant l'énergie primaire (énergie disponible dans la nature avant toute transformation) et le service énergétique est présentée Figure 1.11.

Selon les rendements de conversion des équipements utilisés, au même service énergétique final pourront correspondre des consommations d'énergie (finale, secondaire ou primaire) variables.

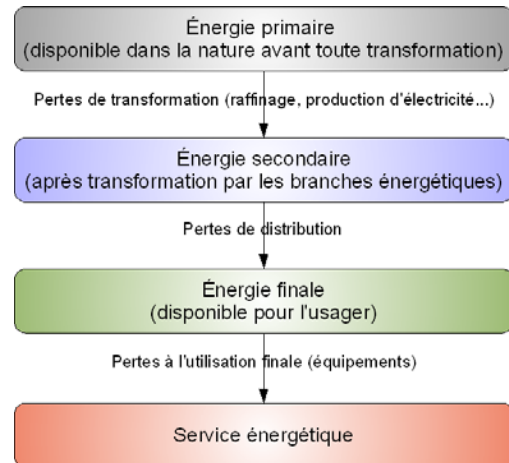


Figure 1.11. Chaîne énergétique

1.2.1.2. La Maîtrise de la Demande d'Énergie (MDE)

La Maîtrise de la Demande d'Énergie est à l'origine un concept américain (« Demand Side Management ») élaboré au cours de la crise du pétrole. Son principe général est qu'il peut être moins coûteux d'investir dans des actions de MDE plutôt que de renforcer le réseau de distribution ou d'augmenter les capacités de production. La demande en énergie apparaît dès lors comme une variable de commande et non plus comme une simple entrée pour déterminer les capacités de production. Les objectifs visés par les programmes de MDE peuvent être multiples : économiser l'énergie (ou contrôler la croissance de la demande d'énergie), contrôler les périodes creuses, réduire les pointes de demande ...

Dans l'objectif particulier d'économiser l'énergie, nous distinguons deux types de mesures :

- les mesures d'efficacité énergétique qui consistent à diminuer la consommation d'énergie pour atteindre un service énergétique égal ou équivalent (installer des lampes basse consommation, améliorer le rendement des centrales électriques...),
- les mesures de sobriété énergétique qui consistent à diminuer la consommation d'énergie au prix d'une détérioration du service énergétique (utilisation d'un ordinateur portable en lieu et place d'un poste de travail...), ou en évitant le gaspillage, lorsque l'énergie est consommée alors qu'il n'y a pas de service énergétique à assurer (éteindre l'éclairage artificiel des pièces inoccupées...).

1.2.1.3. Les différentes composantes d'une politique visant aux économies d'énergie

Dans le cadre de ce travail, une terminologie est adoptée pour distinguer les différentes composantes d'une politique de MDE.

Une **action** est une réalisation concrète sur le terrain telle que l'isolation d'un bâtiment ou le remplacement d'une ampoule incandescente par une lampe basse consommation.

Un **programme** consiste à organiser des ressources (financières, organisationnelles, humaines) de façon à motiver la mise en place d'actions. Les programmes sont de nature très variée : incitations tarifaires (tarifs pointe/hors pointe, crédit d'impôt...), normes (exigences de performances minimales

des appareils), recherche et développement (amélioration des performances énergétiques et économiques des systèmes énergétiques), campagnes de sensibilisation (étiquetage, médias)...

Les programmes de MDE forment généralement une **politique** menée dans le but d'atteindre un objectif général (amélioration de la sécurité énergétique d'une région, réduction des GES...).

1.2.2 L'évaluation des économies d'énergie engendrées par les programmes de MDE

1.2.2.1. Les approches ascendantes et descendantes

Il y a principalement deux approches d'évaluation des résultats engendrés par la mise en place de programmes de MDE. L'approche descendante (dite « top-down ») évalue les économies d'énergie à partir de l'observation de statistiques macro-économiques globales (évolution de la demande, de l'intensité énergétique...) et de la comparaison avec un scénario de référence. L'approche ascendante (dite « bottom-up ») consiste à partir des résultats d'actions mises en place sur le terrain pour parvenir aux résultats généraux.

1.2.2.2. Les étapes à suivre dans le cas d'une approche ascendante

La Figure 1.12 présente, dans le cas d'une approche ascendante, les quatre étapes principales à suivre pour déterminer les économies d'énergie engendrées par la mise en place d'un programme.

Une première étape consiste à évaluer les économies d'énergie annuelles unitaires, ce qui nécessite la définition d'un cas de référence et la prise en compte dans certains cas de l'effet rebond et de facteurs exogènes tels que le climat. Ces économies peuvent être évaluées par des mesures directes (instrumentation avant la mise en place de l'action ou sur un bâtiment témoin), des suivis des consommations (factures / relevés à partir de comptage existant, enquêtes de terrain), ou encore par modélisations et simulations théoriques.

Dans un deuxième temps, l'évaluation des économies d'énergie unitaires, réalisées sur la durée de vie des équipements mis en place, nécessite de connaître cette durée de vie ainsi que la possible évolution des performances avec le temps.

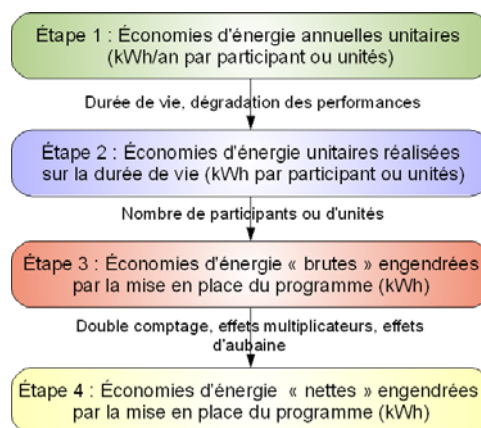


Figure 1.12. Calcul des économies d'énergie engendrées par un programme de MDE (Broc et al., 2007)

Ensuite, l'évaluation des économies « brutes » engendrées par le programme requiert de connaître le nombre d'actions réalisées sur un territoire donné. Enfin, l'évaluation des économies « nettes » engendrées par le programme nécessite de tenir compte de facteurs d'ajustement :

- double comptage : prise en compte des interactions entre programmes (plusieurs programmes peuvent encourager à la réalisation d'actions similaires : étiquetage et exigences minimales) et entre actions (l'exécution d'une première action peut jouer sur l'économie d'énergie réalisée par une deuxième action),
- effets multiplicateurs : une action promue initialement par un programme de MDE va ensuite être reproduite automatiquement par des phénomènes de marché (en dehors du cadre du programme),
- effets d'aubaine : l'utilisateur utilise le cadre d'un programme (support, aide...) pour effectuer une action qu'il aurait de toute façon réalisée.

1.2.3 Evaluation de l'efficacité économique des programmes de MDE

Parce qu'il est impossible d'investir des sommes infinies dans la maîtrise de l'énergie, des critères d'efficacité économique sont nécessaires afin de prioriser les programmes de maîtrise de l'énergie ou d'augmentation des capacités de production à mettre en place (coûte-t-il plus cher d'économiser ou de produire un kilowattheure ?). Les Analyses Coût-Bénéfice (ACB) et Coût-Efficacité (ACE) sont des méthodes couramment utilisées pour évaluer l'efficacité économique de programmes de MDE.

1.2.3.1. Les Analyses Coût-Bénéfice et Coût Efficacité

L'Analyse Coût-Bénéfice²⁰ (ACB) consiste à évaluer les bénéfices afin de les comparer aux coûts sur la base d'un étalon de mesure commun qu'est l'unité monétaire. L'ACB peut porter sur des projets spécifiques (construction d'une autoroute) mais aussi sur des politiques plus larges telles que la lutte contre le changement climatique. Les deux indices que sont le Ratio Bénéfice Coût (équation (1.1)) et la Valeur Actualisée Nette (équation (1.2)) permettent de synthétiser les résultats d'une ACB. Les projets ou politiques ayant les RBC ou les VAN les plus élevés sont à favoriser ; si les coûts sont supérieurs aux bénéfices (VAN < 0, RBC < 1), ceux-ci ne remplissent pas le critère coût-bénéfice et ne sont théoriquement pas à réaliser.

$$RBC = \frac{\sum_{i=t_0}^{t_0+T} \frac{B_i}{(1+a)^i}}{\sum_{i=t_0}^{t_0+T} \frac{C_i}{(1+a)^i}} \quad (1.1)$$

$$VAN = \sum_{i=t_0}^{t_0+T} \frac{B_i - C_i}{(1+a)^i} + V_r - I_0 \quad (1.2)$$

Avec : a : taux d'actualisation, B_i : bénéfices réalisés durant l'année i , C_i : coûts durant l'année i , t_0 : année de mise en place, T : durée du programme, V_r : valeur résiduelle du projet, I_0 : investissement initial.

Si l'ACB compare l'ensemble des avantages par rapport à l'ensemble des coûts, l'Analyse Coût-Efficacité (ACE) évalue l'ensemble des coûts relativement à un objectif donné. Dans ce cas, l'objectif d'un projet ou d'une politique représente le bénéfice et tous les autres impacts sont pris en compte en tant que coûts positifs ou négatifs. L'objectif recherché doit alors être exprimé en unités physiques²¹ et les autres coûts et bénéfices sont à monétiser (Figure 1.13). Ainsi, dans le cas d'un objectif de réduction des émissions de GES, les résultats de l'ACE aboutiront à des coûts (en €) par tonne de GES évitée.

L'ACE permet une optimisation sous contrainte lorsque l'on recherche :

- la manière la plus efficace (à moindre coût) pour atteindre un objectif (par exemple une réduction des émissions de polluants),
- le moyen d'obtenir le bénéfice le plus important (par exemple une réduction des émissions de polluants) avec une contrainte de coût.

Ainsi, si l'ACA adopte un point de vue global (a-t-on une augmentation du bien-être d'un agent privé ou de la société ?), l'ACE adopte une perspective plus restreinte en ciblant les résultats recherchés.

²⁰ Aucune distinction n'est faite entre Analyse Coût Bénéfice et Analyse Coût Avantage.

²¹ Ce qui constitue un avantage lorsque la monétisation de l'objectif recherché est controversée ou sujette à des incertitudes.

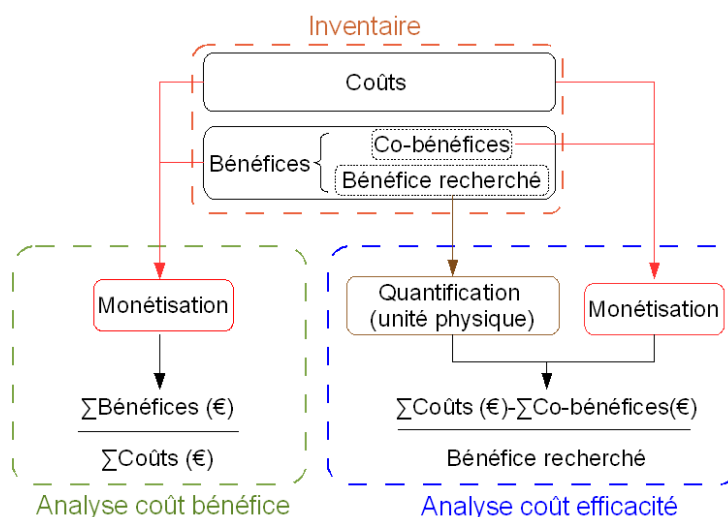


Figure 1.13. Comparaison entre Analyse Coût Bénéfice et Analyse Coût Efficacité

1.2.3.2. Les courbes de coûts de réduction²²

Les ratios résultant des ACE ou ACB ne fournissent aucune information concernant les potentiels d'économies d'énergie ou de réduction de pollution atteignables. Ces informations sont pourtant de première importance dans le but de hiérarchiser différentes options et notamment dans le cas d'une optimisation sous contrainte (objectif d'économie d'énergie fixé ou budget fixé).

Il est cependant possible de présenter les résultats sous formes de courbes dites de coûts de réduction. Les courbes de réduction (des consommations d'énergie, de la pollution) expriment les coûts unitaires de réduction (€/tonne de CO₂ évitée, €/kWh économisé) en fonction du potentiel de réduction atteignable. La Figure 1.14 a par exemple était élaborée par Brown et al. (2008) dans le but d'étudier les potentiels de réduction de la consommation résidentielle d'électricité aux Etats-Unis. Chaque barre du graphique représente un ensemble de mesures d'amélioration d'efficacité énergétique pour un usage donné, la hauteur de cette barre exprimant le coût unitaire de l'électricité économisée par cet ensemble de mesures, sa largeur le potentiel d'économie à horizon 2030. Dans cet exemple, les mesures relatives à l'amélioration des postes de télévision et de l'éclairage sont les plus efficaces et celles liées à l'éclairage et à la climatisation ont les potentiels les plus élevés. De plus, pour chacun des usages présentés ici, il est plus avantageux d'économiser un kilowattheure électrique que d'en acheter un (9,4 ct\$/kWh).

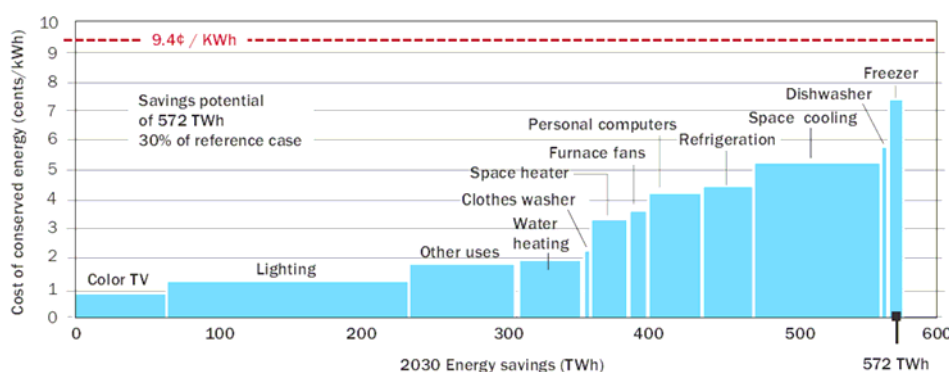


Figure 1.14. Potentiel de réduction de la consommation résidentielle d'électricité aux Etats-Unis à horizon 2030 (Brown et al., 2008)

²² Conservation supply curves, Abatement cost curves, Energy conserved « supply » curves.

Selon les objectifs de l'étude, ce type de courbe peut être tracé à des échelles géographiques plus ou moins grandes (territoire, bâtiment...) et aborder un ou plusieurs secteurs (transport, bâtiment...). Elles sont une aide à la décision précieuse dans le but :

- de comparer les coûts de production de l'énergie aux coûts des économies (nous attirons cependant l'attention sur le fait que l'économie d'un kWh ne doit pas être comparée avec la production d'1 kWh car les pertes de transport et de distribution doivent être prises en compte),
- de déterminer la stratégie de moindre coût pour un objectif de réduction donné,
- de déterminer la stratégie engendrant les économies les plus importantes pour un budget donné.

L'effet « tunnel » sur les coûts

Les courbes de coût de réduction sont généralement croissantes, reflétant l'idée que plus l'on souhaitera économiser d'énergie (ou réduire la pollution), plus les coûts marginaux des solutions à favoriser deviendront élevés. Cependant, à partir d'un certain seuil d'économies d'énergie, l'obtention d'économies plus importantes peut se réaliser à un coût marginal plus faible. C'est ce phénomène que Lovins (2004) a théorisé sous le nom d'effet « tunnel » (Figure 1.15).

A titre d'exemple, plus l'enveloppe d'un bâtiment est performante, plus les coûts marginaux sont élevés. Toutefois, il peut exister un niveau de performance permettant d'éviter la mise en place de systèmes de chauffage et de climatisation, entraînant alors une réduction brutale des coûts.

Dans certaines configurations, réaliser des économies d'énergie importantes peut donc s'avérer moins coûteux que de se restreindre à des niveaux d'économies modérés.

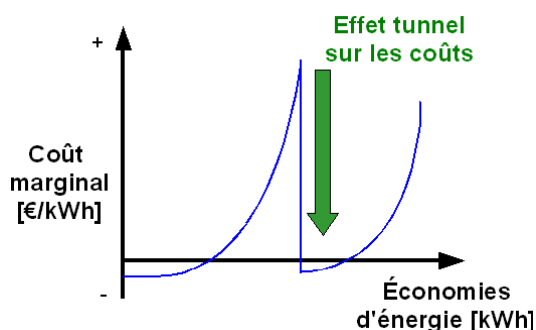


Figure 1.15. Description de l'effet « tunnel » sur les coûts de réduction

1.2.3.3. Terminologie retenue pour caractériser les coûts et bénéfices

Biens (et services) marchands et non marchands

Dans le cadre de ce travail, nous effectuons une première distinction entre :

- les biens ou services marchands qui sont échangés sur un marché (par exemple les filtres),
- les services non marchands qui ne sont pas échangés sur un marché (par exemple la qualité de l'air, les promenades en forêt, le silence) et auxquels il est généralement délicat de donner une valeur monétaire.

Coûts privés généralisés

Les coûts généralisés font référence aux coûts pris en compte dans le processus de décision d'agents économiques privés. Ces coûts comprennent les coûts de biens ou services marchands (dépenses réelles) ainsi que services non marchands, tels que le confort ou la durée d'un voyage lorsque l'on compare différents modes de transport.

Coûts sociaux et coûts externes

Les coûts généralisés ne reflètent pas nécessairement tous les coûts qu'une décision crée pour la société. Les activités de production d'électricité sont par exemple à l'origine d'impacts ayant des conséquences sur le bien-être de la collectivité parmi lesquels les émissions de polluants, les nuisances sonores ou encore la détérioration des aménités du territoire. Ces impacts sont regroupés sous le terme d'externalités. Il existe une externalité négative (ou positive) lorsque qu'un acteur économique fait supporter un coût (ou apporte un bénéfice) à un autre acteur sans qu'il existe un marché de droits de propriété tel que l'acteur lésé (ou favorisé) puisse se faire payer (ou doive payer) par celui qui le lèse (ou celui qui l'avantage) (Giraud, 2004).

Les coûts des externalités (ou coûts externes) ne sont pas pris en compte dans le processus de décision privé, excepté si les institutions politiques (représentant la collectivité) les ont internalisés (avec des taxes par exemple). Les externalités peuvent être des biens ou services marchands (création d'un logiciel libre) ou non marchands (pollution).

Les coûts (ou bénéfices) sociaux d'une activité comprennent à la fois les coûts généralisés de tous les membres de la collectivité impactés (positivement ou négativement) et l'ensemble des externalités. Le bien-être sociétal est défini comme la somme des externalités et de tous les bien-être individuels sans distinction.

Terminologie retenue

Pour la suite du travail, nous retenons la terminologie décrite ci-dessus (et représentée Figure 1.16) pour caractériser les coûts et bénéfices.

Selon les situations (agents économiques privés, collectivité, types de projet), une Analyse Coût-Bénéfice peut être réalisée à partir des coûts généralisés ou des coûts sociaux. Comme l'indique la Figure 1.16, les coûts et les bénéfices à prendre en compte sont alors différents.

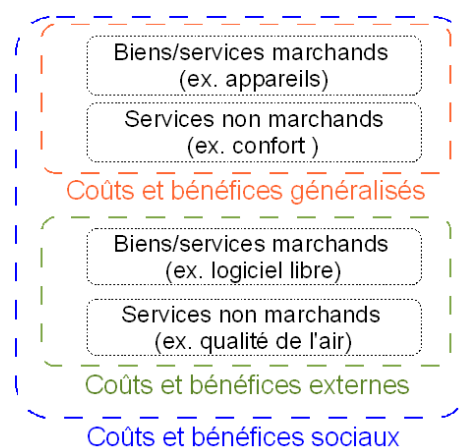


Figure 1.16. Terminologie retenue pour caractériser les coûts et bénéfices

1.2.3.4. Les limites de l'ACB

Dernièrement, l'OCDE (2007) a fait appel à des experts pour passer en revue les développements récents intervenus dans le domaine de l'ACB et évaluer l'apport de celle-ci à l'efficacité des processus de décision. Si plusieurs gouvernements²³ exigent déjà que soit menée une analyse coûts-bénéfices pour de nouvelles réglementations, grands projets, ou mesures environnementales, certains aspects de l'ACB prêtent toujours à débat.

Actualisation, comment traiter les impacts de long terme ?

Les coûts et bénéfices d'un projet ou d'une politique s'étalent dans le temps, intervenant parfois à un horizon temporel très éloigné (le CO₂ a une durée de vie dans l'atmosphère d'environ 100 ans, certains déchets nucléaires resteront dangereux pendant plusieurs millénaires...). Dans la pratique, les coûts et bénéfices futurs sont actualisés afin de les comparer à ceux d'aujourd'hui. L'actualisation conduit mécaniquement à minorer les impacts, positifs ou négatifs, d'un investissement, et ce d'autant plus que ces effets se trouvent éloignés dans le temps, ce qui peut paraître en contradiction avec la prise en compte du long terme.

Comme le rappelle l'OCDE (2007), les activités actuelles qui imposent d'importants coûts aux générations futures peuvent sembler insignifiantes dans une analyse coûts-bénéfices. De même, on risque de ne pas prendre des initiatives dont les coûts sont supportés aujourd'hui, mais dont les bénéfices ne seront perçus que par les générations futures.

²³ Au Canada, une ACB doit être effectuée pour toutes les propositions réglementaires dont le coût actuel estimé est supérieur à 50 millions de dollars. Aux États-Unis, elle est exigée si la réglementation induit des coûts annuels supérieurs à 100 millions de dollars (ou génère d'autres impacts significatifs tels que des incidences sur l'emploi, sur la compétitivité, etc.).

La relation entre taux d'actualisation et horizon temporel est en fait régie par deux effets contradictoires :

- un effet « richesse » qui suppose que les générations à venir seront de plus en plus riches (progrès technologique...) et incite à faire d'autant moins d'effort que la génération est éloignée,
- un effet « précaution » qui considère les incertitudes sur le niveau de vie des générations à venir (croissance économique, raréfaction des ressources, pollutions globales) et incite à faire des efforts importants pour les générations futures.

De nombreuses discussions portent sur le choix des taux d'actualisation. Philibert (1999) énumère par exemple les arguments en faveur des taux d'actualisation faibles et ceux en faveur des taux décroissant dans le temps. Il ne retient pas les arguments en faveur d'un taux d'actualisation faible ou nul notamment parce qu'ils impliqueraient davantage de sacrifices pour les générations actuelles, bien que les générations futures puissent être plus riches. Cela reviendrait en effet à consentir beaucoup d'efforts pour le très long terme en sacrifiant le moyen terme. Philibert (1999), ou encore Gollier (2005), recommandent l'utilisation de taux décroissants dans le temps pour des horizons temporels éloignés (supérieurs à 30 ans par exemple). Selon eux, cette pratique permet le meilleur compromis entre ces effets « richesse » et « précaution ».

La pratique de l'actualisation pour les projets impactant le long terme est régulièrement contestée. Une modulation du taux d'actualisation en fonction du temps peut être adoptée pour améliorer les comparaisons intergénérationnelles.

Les coûts et bénéfices sont-ils équitablement répartis ?

Dans une ACB, une mesure publique est jugée économiquement efficiente si les bénéfices procurés par son introduction sont supérieurs aux coûts qu'elle induit, quelle que soit l'identité des « gagnants » et des « perdants ». Par exemple, si une station d'épuration des eaux est installée dans le quartier le plus pauvre d'une ville, on pourrait objecter que si tous les résidents bénéficient d'une eau plus propre, ceux qui vivent à proximité de la station subissent en revanche la vue de cette construction disgracieuse. La valeur de l'immobilier à proximité de la station est appelée à chuter, de sorte qu'en fin de compte, les habitants les plus défavorisés de la ville supporteront une part disproportionnée de la charge financière. Aussi, faut-il garder à l'esprit que l'ACB n'assure pas nécessairement un partage équitable des coûts et bénéfices. Toutefois, il reste possible d'insérer des coefficients de pondération dans le calcul d'ACB (plus élevés pour les coûts et bénéfices associés aux catégories défavorisées) ou a posteriori de mettre en place un système de compensation (OCDE, 2007).

Est-il légitime de baser des décisions politiques sur une analyse monocritère ?

Une analyse monocritère telle que l'ACB ne peut généralement pas suffire à la décision politique. De façon générale, l'ACB doit être vue comme un outil d'aide à la décision. Comme le rappelle Boiteux (2001), « l'intérêt de faire du bilan socio-économique non le critère mais le noyau de l'estimation de la valeur d'un projet, c'est de permettre une analyse des raisons pour lesquelles on est conduit à s'écarter de la solution à laquelle ce bilan aurait conduit, et de pouvoir chiffrer le surcoût de la décision ».

1.2.4 Conclusions

Parce qu'il est impossible d'investir des sommes infinies dans la maîtrise de l'énergie, des critères d'efficacité économique sont nécessaires afin de prioriser les programmes de maîtrise de l'énergie ou d'augmentation des capacités de production à mettre en place. Les Analyses Coût-Bénéfice (ACB) et Coût-Efficacité (ACE) sont des méthodes couramment utilisées pour évaluer l'efficacité économique de programmes de MDE. Selon les situations (agents économiques privés, collectivité, types de projet), ces analyses peuvent être réalisées à partir des coûts généralisés ou des coûts sociaux. Dans les deux cas, il convient d'effectuer un bilan des différents coûts, ce qui nécessite généralement un exercice de monétisation de biens et services non marchands.

1.3 Formulation des objectifs et développement d'une méthodologie

1.3.1 Formulation des objectifs

1.3.1.1. Objectif général

Si la climatisation individuelle reste marginale en France, les ventes d'appareils lors des dernières canicules et l'exemple de la climatisation dans l'automobile ont montré que sa généralisation était tout à fait envisageable. Susceptible d'être accentué par le changement climatique, ce poste de consommation pourrait s'accompagner d'impacts environnementaux, directs et indirects, importants.

Dans ce cadre, l'objectif général de la thèse est l'évaluation, sous l'angle coût-bénéfice, de différentes solutions de MDE portant sur le confort d'été. Ce travail, réalisé dans un contexte français, permettra d'établir des recommandations sur les solutions à privilégier en vue de diminuer les impacts environnementaux liés au confort d'été, que ce soit à l'échelle du bâtiment ou à celle du territoire.

L'étude de la réduction du pic estival de demande d'électricité ne sera pas abordée dans ce travail. C'est une problématique qui doit être étudiée et modélisée finement et qui nécessiterait un travail spécifique (voir les travaux de reconstitution et d'agrégation de courbes de charge d'Orphelin (1999)).

1.3.1.2. Précision du champ de l'étude

De nombreux facteurs font de la caractérisation d'un programme de MDE un exercice très délicat (évaluation des effets d'aubaine et des effets multiplicateurs par exemple). La détermination du nombre d'actions réalisées constitue déjà en soi un exercice difficile. De plus, pour une même action (installation d'un appareil efficace par exemple), il existe de multiples programmes possibles (étiquetage, normes, incitations financières...) aux caractéristiques très hétérogènes. **Pour toutes ces raisons, nous avons choisi de nous concentrer sur l'étude d'actions de MDE et non sur l'évaluation de programmes²⁴.**

Les actions seront étudiées sous les angles privé et sociétal. Adopter le point de vue sociétal nécessitera de ne pas se limiter à l'examen de la rentabilité uniquement financière mais de calculer la rentabilité socio-économique en intégrant des composantes qui tiennent compte des bénéfices et des coûts que devra supporter la collectivité (prise en compte des externalités, choix du taux d'actualisation...).

Si la méthodologie développée dans cette thèse peut être appliquée aux bâtiments neufs, **le choix est fait de se focaliser uniquement sur le parc existant** qui représente aujourd'hui environ 75 % des nouvelles installations de climatiseurs individuels (en puissance frigorifique). Les secteurs résidentiel et tertiaire seront étudiés.

1.3.2 Prise en compte des spécificités liées à l'évaluation d'actions de MDE relatives au confort d'été

1.3.2.1. L'existence d'interactions entre les usages énergétiques

Dans le bâtiment, les services énergétiques sont rarement découplables et jouer sur un usage donné impacte généralement d'autres usages. A titre d'exemple, la mise en place de protections solaires réduit la fraction du rayonnement solaire incident qui est absorbé ou transmis, et transformé en chaleur dans le bâtiment. Ainsi, si ces protections sont une solution pour réduire la demande de climatisation, elles peuvent aussi augmenter la demande de chauffage, ce qui constitue une première interaction.

²⁴ Toutefois, il existe une possibilité de réutilisation des résultats pour des utilisateurs cherchant à étudier un programme particulier en suivant une approche de type « ascendante ».

D'autre part, les stores réduisent la quantité de luminosité naturelle à pénétrer dans le local et peuvent donc accroître la demande d'éclairage artificiel. Enfin, ce dernier phénomène s'accompagne d'une augmentation des charges internes, et donc, de la demande de refroidissement.

L'existence d'interactions inter-usages fait qu'il est impossible de se concentrer uniquement sur un seul usage (réduction des consommations de climatisation par exemple) sous peine de négliger une part importante des consommations d'énergie et de fournir des résultats biaisés.

Par la suite, il apparaît donc nécessaire de prendre en compte les différents usages énergétiques au sein du bâtiment, et non uniquement la climatisation.

1.3.2.2. Combinaisons d'action

Les économies d'énergie engendrées par la mise en place d'une action de MDE dépendent des caractéristiques du bâtiment et notamment des actions qui auront déjà été mises en place. Ainsi, la quantité d'énergie économisée grâce à une meilleure isolation dépendra de l'efficacité du système de chauffage installé. De plus, les économies d'énergie générées par un ensemble d'actions ne correspondront pas nécessairement à la somme des économies d'énergie engendrées par ces actions si elles avaient été mises en place de façon isolée.

Les performances d'une action doivent donc être évaluées à la fois dans le cas où cette dernière est mise en place de façon isolée, et dans le cas où celle-ci est intégrée au sein d'un ensemble d'actions.

1.3.2.3. Un grand nombre de possibilités d'amélioration

Les actions d'améliorations du confort d'été envisageables sont nombreuses (climatiseurs plus ou moins efficaces, solutions d'enveloppe, usage du bâtiment) et devront être étudiées à la fois individuellement et collectivement. La méthodologie retenue pour évaluer les économies d'énergie doit tenir compte du nombre important de configurations à étudier.

Tout d'abord, les simulations dynamiques de bâtiment ont été préférées aux mesures directes ou aux suivis de consommation plus coûteux en termes de temps et de moyens.

D'autre part, les améliorations à étudier peuvent se séparer en deux catégories : celles qui permettent de réduire les besoins de refroidissement du bâtiment (usage, enveloppe), et celles qui, pour un besoin donné, permettent de réduire la consommation d'énergie (climatiseur efficace). **Afin de réduire le nombre de simulations à réaliser, nous avons choisi d'étudier séparément les appareils de climatisation d'une part et l'enveloppe et les usages d'autre part. Les résultats obtenus seront ensuite rassemblés dans le but d'évaluer les différentes combinaisons d'actions envisageables.**

La réalisation de ce dernier point nécessite de développer une méthode permettant de calculer la consommation d'électricité des appareils de climatisation directement à partir des besoins de refroidissement des bâtiments.

1.3.2.4. La prise en compte des impacts environnementaux

Idéalement, l'évaluation des impacts environnementaux et des consommations d'énergie devrait prendre en compte toutes les étapes du cycle de vie des produits. Dans cette thèse, la réalisation d'une Analyse en Cycle de Vie (ACV) pour chacune des différentes solutions d'amélioration du confort d'été n'a pas été possible.

Cependant, dans le cas des climatiseurs, il apparaît nécessaire de réaliser une ACV afin de tenir compte des fuites de fluides frigorigènes (usage et fin de vie) qui peuvent représenter des émissions de GES significatives (partie 1.1.3.2).

Au final, les impacts environnementaux évalués ne comprendront que les consommations d'énergie lors de la phase d'utilisation des équipements, les émissions de GES associées à cette consommation, et les émissions directes de GES qui ne concernent que l'usage climatiseurs.

1.3.2.5. Préservation et détérioration du service énergétique

En matière de confort thermique, la comparaison entre bâtiments climatisés et bâtiments non climatisés peut prêter à débat. Les conditions climatiques intérieures diffèrent et de nombreux bâtiments non climatisés sont jugés confortables sans pour autant assurer le respect d'une consigne de température en été.

Dans un premier temps, il est donc nécessaire de s'arrêter sur la définition de ce qu'est une ambiance thermique confortable et notamment sur les différences susceptibles d'exister dans ce domaine entre locaux climatisés et non climatisés.

D'autre part, la notion de service énergétique est fondamentale dans l'étude de solutions de MDE. Dans le cas du confort d'été, ce service n'est pas toujours égal selon les solutions étudiées et il est par exemple possible de diminuer les consommations d'énergie au prix de quelques heures d'inconfort. En outre, les solutions diffèrent en termes de confort sonore. L'appareil de climatisation ainsi que les bruits provenant de l'extérieur, lorsque les fenêtres d'un local sont ouvertes, peuvent être à l'origine de nuisances sonores importantes qu'il faudra étudier.

Les coûts d'inconfort doivent donc être intégrés dans le bilan des coûts généralisés, ce qui nécessite un travail de monétisation de services non marchands (confort thermique et sonore).

1.3.2.6. La prise en compte du facteur temps dans l'évolution des performances et des coûts

Les actions efficaces et pertinentes aujourd'hui le seront-elles demain ? La réponse à cette question nécessite de prendre en compte l'évolution dans le temps de certains paramètres technico-économiques (évolution du coût de l'énergie, courbes d'apprentissages). Dans le cas particulier du confort d'été, l'impact éventuel du changement climatique sur l'inconfort estival et la demande de climatisation doit aussi être envisagé et étudié.

1.3.3 Conclusion : méthodologie développée

Le travail de thèse repose sur quatre étapes principales. Les trois premières permettent de regrouper toutes les informations nécessaires aux analyses technico-économiques réalisées en dernière partie afin de répondre à l'objectif général.

1.3.3.1. Monétisation des externalités et des coûts d'inconfort

Dans cette étude le confort thermique est le service énergétique recherché. Dans un premier temps, nous nous arrêterons sur la définition de ce qu'est une ambiance thermique confortable et notamment sur les différences susceptibles d'exister dans ce domaine entre bâtiments climatisés et non climatisés.

Ensuite, les coûts d'inconfort devant être intégrés dans le bilan des coûts généralisés, il sera nécessaire de développer des méthodes permettant de les monétiser.

Enfin, les actions d'amélioration du confort d'été étant étudiées sous l'angle sociétal, il faudra tenir compte des externalités qui devront être identifiées et se verront attribuer une valeur monétaire.

1.3.3.2. Caractérisation d'actions d'amélioration du confort d'été portant sur l'enveloppe et l'usage du bâtiment

Jouer sur l'enveloppe et l'usage des bâtiments peut permettre de réduire les besoins de refroidissement et les surchauffes estivales. Il nous faudra évaluer les potentiels de ce type d'actions qui devront être caractérisées à la fois en termes de coûts et d'évolution des besoins d'énergie (pour plusieurs usages). Les locaux non climatisés représentant aujourd'hui la majorité des bâtiments français, les bénéfices des actions d'enveloppe et d'usage du bâtiment devront aussi être évalués en termes d'amélioration du confort estival.

1.3.3.3. Evaluation des performances environnementales des climatiseurs individuels et perspectives d'évolution

Concernant les appareils de climatisation, il conviendra d'évaluer le potentiel d'amélioration de leurs performances et les coûts associés. Ce travail reposera sur la réalisation d'une Analyse en Cycle de Vie afin d'intégrer notamment les émissions directes de GES. Enfin, nous avons vu qu'une méthode permettant de calculer la consommation d'électricité des appareils de climatisation directement à partir des besoins de refroidissement des bâtiments devait être développée.

1.3.3.4. Evaluation technico-économique des actions de MDE liées au confort d'été

Dans un contexte français, des solutions d'amélioration du confort d'été seront évaluées en termes de potentiel d'économie d'énergie, de réduction des émissions de GES mais aussi de performance économique. Ceci permettra d'établir des recommandations sur les meilleures solutions à privilégier en vue de diminuer les impacts liés au confort d'été. Enfin, un travail prospectif sera réalisé afin d'effectuer des projections sur l'impact de la climatisation individuelle sur les consommations d'énergie et les émissions de GES à l'échelle de la France.

Chapitre 2. Monétisation de l'inconfort et des externalités

Table des matières

CHAPITRE 2. MONÉTISATION DE L'INCONFORT ET DES EXTERNALITES	35
TABLE DES MATIERES	37
INTRODUCTION	39
2.1 ANALYSE DES METHODES D'EVALUATION DU CONFORT THERMIQUE DANS LES BATIMENTS CLIMATISES ET NON CLIMATISES	41
2.1.1 PRESENTATION DES PHENOMENES REGISSANT LE CONFORT THERMIQUE	41
2.1.2 PRESENTATION DE L'APPROCHE ANALYTIQUE	45
2.1.3 L'APPROCHE ADAPTATIVE	51
2.1.4 CONCLUSIONS	58
2.2 APERÇU DES METHODES DE MONÉTISATION DES BIENS ET SERVICES NON MARCHANDS (EXTERNALITES ET COUTS PRIVES)	59
2.2.1 LES METHODES BASEES SUR L'EXPERTISE DES DOMMAGES (OU DE LA DETERIORATION DE BENEFICES)	59
2.2.2 LES METHODES BASEES SUR LES PREFERENCES INDIVIDUELLES (DETERMINATION DU CONSENTEMENT A PAYER)	59
2.3 MONÉTISATION DES COUTS D'INCONFORT	61
2.3.1 LES CONSEQUENCES DE L'INCONFORT THERMIQUE D'ETE	61
2.3.2 MONÉTISATION DE L'INCONFORT DANS LE SECTEUR TERTIAIRE	62
2.3.3 MONÉTISATION DE L'INCONFORT THERMIQUE DANS LE SECTEUR RESIDENTIEL	67
2.3.4 ETUDE DU CONFORT ACOUSTIQUE	70
2.4 MONÉTISATION DES EXTERNALITES LIEES AU CONFORT D'ETE	72
2.4.1 DETERMINATION DES EXTERNALITES A PRENDRE EN COMPTE DANS CETTE ETUDE	72
2.4.2 MONÉTISATION DES EXTERNALITES ENVIRONNEMENTALES (HORS EFFET DE SERRE)	73
2.4.3 MONÉTISATION DES EXTERNALITES LIEES AU CHANGEMENT CLIMATIQUE	76
2.4.4 ETUDE DES EXTERNALITES NON-ENVIRONNEMENTALES	81
2.4.5 CALCUL DES EXTERNALITES ASSOCIEES A LA CONSOMMATION D'ENERGIE	84
2.5 CONCLUSION : RECAPITULATIF DES METHODES RETENUES POUR LA SUITE DE L'ETUDE QUANT A L'EVALUATION ET LA MONÉTISATION DE L'INCONFORT ET DES EXTERNALITES	88

Introduction

L'objectif général du présent chapitre est double. Il s'agit à la fois d'éclaircir le concept d'ambiance climatique confortable mais aussi de monétiser l'inconfort et les externalités afin de pouvoir les intégrer par la suite dans la comparaison de différentes solutions d'amélioration du confort d'été (chapitre 5).

Dans un premier temps, nous devons appréhender la définition de ce qu'est une ambiance thermique confortable, et notamment les différences susceptibles d'exister dans ce domaine entre bâtiments climatisés et non climatisés. Il s'agira de réduire la notion d'inconfort thermique à des grandeurs physiques ou sociologiques mesurables et aisément utilisables dans la suite du travail.

Ensuite, les coûts d'inconfort et les coûts externes devant être intégrés dans le bilan des coûts sociétaux, il nous faudra proposer des méthodes permettant de les monétiser. Aussi, après avoir esquissé une présentation des différentes méthodes de monétisation des biens et services non marchands, nous déterminerons et évaluerons les coûts d'inconfort pouvant intervenir dans le choix d'une action d'amélioration du confort d'été. De même, les externalités à prendre en compte seront identifiées puis monétisées.

2.1 Analyse des méthodes d'évaluation du confort thermique dans les bâtiments climatisés et non climatisés

La notion de service énergétique est fondamentale pour l'étude de solutions de maîtrise de la demande d'énergie (chapitre 1). Nous nous intéresserons ici au confort thermique et chercherons à spécifier et à analyser ce qu'est une ambiance thermique confortable et notamment les différences susceptibles d'exister dans ce domaine entre bâtiments climatisés et non climatisés.

Le confort thermique est souvent défini par la satisfaction exprimée quant à l'ambiance thermique²⁵. Il existe une distinction entre l'inconfort thermique global (pour le corps considéré dans son ensemble) et l'inconfort thermique local qui correspond à un refroidissement ou à un réchauffement local non désiré du corps (asymétrie de température, courant d'air, etc.). Les inconforts thermiques locaux sont à prendre en compte lors de la conception de bâtiments ou de systèmes de climatisation mais ne seront pas considérés dans ce travail qui ne traite pas d'installations spécifiques.

Dans cette partie, nous étudions les deux approches principales d'évaluation du confort global : les approches analytiques et adaptatives. L'application de ces approches dans la dernière norme relative au confort thermique EN 15251²⁶ (CEN, 2007) est aussi présentée afin d'appréhender les pratiques usuelles d'évaluation du confort. Cette norme a été élaborée dans le but d'appuyer certaines exigences de la directive européenne EPBD (CE, 2002) relative à la performance énergétique des bâtiments²⁷. Elle spécifie notamment des méthodes pour l'évaluation « à long terme » (saison, année) des ambiances intérieures (notamment thermiques).

2.1.1 Présentation des phénomènes régissant le confort thermique

Le confort thermique humain est régi par de nombreux phénomènes physiologiques (thermorégulation, homéothermie), physiques (création et échanges de chaleur avec l'environnement extérieur), psychologiques et sociologiques, qui sont présentés dans cette partie.

2.1.1.1. Homéothermie et thermorégulation

Afin d'assurer leur propre survie, les cellules doivent trouver l'énergie nécessaire à leur fonctionnement en dégradant les molécules organiques ou minérales, c'est le phénomène de catabolisme. Elles doivent aussi fabriquer les molécules nécessaires à leur renouvellement (lipides, glucides, acides aminés...), c'est le phénomène d'anabolisme. Ces deux grands ensembles de réactions sont regroupés sous le nom de métabolisme.

Ces réactions biochimiques au sein des cellules permettent de maintenir l'organisme en activité et nécessitent la présence de catalyseurs que sont les enzymes. Ces enzymes se comportent de manière optimale entre 35 et 37,6 °C. En dehors de cet intervalle de température, ceux-ci fonctionnent moins bien, voire ne fonctionnent plus, et certaines fonctions ne peuvent plus être assurées par l'organisme. C'est pourquoi, la température centrale²⁸ de l'homme doit être maintenue autour de 37 °C quelles que soient les conditions climatiques dans lesquelles il se trouve : c'est le phénomène d'homéothermie.

²⁵ Thermal comfort is « that condition of mind which expresses satisfaction with the thermal environment and is assessed by subjective evaluation » (ASHRAE, 2004).

²⁶ Critères d'ambiance intérieure pour la conception et l'évaluation de la performance énergétique des bâtiments couvrant la qualité de l'air intérieur, la thermique, l'éclairage et l'acoustique.

²⁷ Comme rappelé dans son introduction : une déclaration sur l'énergie sans une déclaration relative à l'ambiance intérieure est dénuée de sens. Il est donc nécessaire que soient spécifiés des critères relatifs à l'ambiance intérieure pour la conception, les calculs énergétiques, les performances et l'exploitation des bâtiments.

²⁸ Celle d'un noyau central représenté par l'ensemble des organes situés dans le crâne, la cavité abdominale et la cavité thoracique.

D'autre part, ces réactions libèrent aussi de l'énergie sous forme de chaleur. Le phénomène qui permet d'évacuer cette chaleur de l'intérieur vers l'extérieur afin d'assurer l'homéothermie se nomme la thermorégulation. C'est un phénomène dynamique de régulation qui vise à assurer une température de consigne (d'environ 37 °C pour la température centrale et d'environ 32 °C pour la température cutanée).

Le phénomène de thermorégulation fait intervenir des thermorécepteurs internes et cutanés sensibles au chaud ou au froid. Les informations provenant de ces capteurs convergent vers l'hypothalamus qui, après les avoir traitées (amplitude et différence par rapport aux consignes), envoie des signaux de commande vers les organes effecteurs. Les réactions engendrées peuvent être conscientes (adaptation comportementale) ou inconscientes (vasodilatation²⁹, vasoconstriction³⁰, frisson³¹ et sudation³²).

L'homme étant homéotherme, la neutralité thermique (bilan thermique global nul) est à assurer en continu *via* le système de thermorégulation, c'est une condition nécessaire au confort thermique.

2.1.1.2. Les différents phénomènes physiques de production et d'échange de chaleur

Pour assurer la stabilité de ses températures corporelles, l'organisme de l'homme doit se trouver en équilibre thermique avec son environnement. L'énergie produite par le métabolisme est transportée vers la peau (thermorégulation) puis cédée à l'environnement. Les phénomènes physiques de production de chaleur et d'échange d'énergie entre l'homme et son environnement sont présentés dans cette partie.

La production de chaleur

D'après Candas (1998), la quantité de chaleur métabolique produite se déduit de la consommation d'oxygène calculée à partir des débits d'air ventilés et de la différence de concentration entre l'air inspiré et expiré. Ceci s'explique par le fait que la production de chaleur métabolique est le reflet de la vie cellulaire qui résulte de la consommation d'oxygène et provoque un dégagement de gaz carbonique dont les quantités varient en fonction du substrat énergétique dégradé (glucides, lipides, protides). Dans la pratique, il existe des tables donnant les valeurs de métabolisme en fonction de l'activité du sujet. Le « met » a été introduit pour quantifier le métabolisme : il correspond à l'activité d'une personne assise au repos (1 met = 58 W par m² de surface cutanée).

Les phénomènes d'échange de chaleur

L'homme échange de l'énergie avec son environnement extérieur selon quatre mécanismes : la conduction, la convection et le rayonnement, qui sont des échanges de chaleur sensible, et l'évaporation qui est un échange de chaleur latente (Figure 2.1). Les échanges respiratoires, mentionnés sur cette figure, sont une association d'échanges par convection et par évaporation.

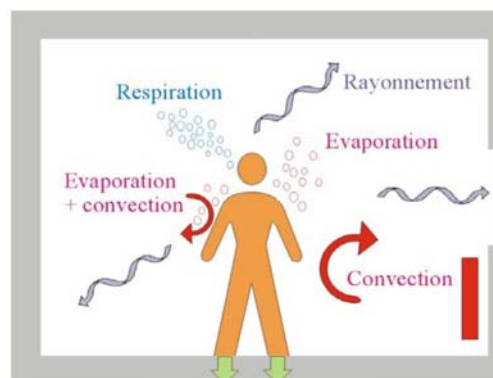


Figure 2.1. Les différents mécanismes d'échange de chaleur entre l'individu et son environnement (METLTM, 2003)

²⁹ La vasodilatation consiste à accroître les diamètres des vaisseaux sanguins, augmentant ainsi le débit sanguin et les échanges de chaleur vers l'extérieur.

³⁰ La vasoconstriction consiste à diminuer les diamètres des vaisseaux sanguins, réduisant ainsi le débit sanguin et les échanges de chaleur vers l'extérieur.

³¹ Contraction des muscles permettant d'amplifier la production de chaleur.

³² La sudation permet de refroidir le corps par évaporation.

La conduction est le phénomène d'échange de chaleur entre la peau et les éléments solides avec lesquelles la peau est en contact. Lorsque l'homme échange de la chaleur par conduction mais que seules de petites zones corporelles sont concernées (par exemple la surface inférieure du pied pour un homme debout), ces échanges sont alors négligeables. Lorsque des surfaces corporelles plus grandes sont en contact avec des éléments de mobilier (chaise, lit...), les tissus en contact se mettent rapidement en équilibre et se comportent comme un isolant thermique par rapport à l'ambiance (Candas, 1998). Dès lors, ce phénomène est inclus dans les échanges convectifs en augmentant le facteur d'isolation vestimentaire.

La convection est le phénomène d'échange de chaleur entre la peau et l'air ambiant. Lorsque ce dernier est plus froid que la surface cutanée, il s'échauffe au contact de la peau. Il se déplace alors vers le haut car il est plus léger que l'air ambiant (ce dernier étant plus froid). L'amplitude du phénomène est directement liée à la différence de température entre la peau et l'air ambiant mais aussi aux vitesses d'air au voisinage du corps. Ces vitesses d'air relatives (par rapport au corps), doivent prendre en compte l'activité du sujet (marche...) en plus du mouvement effectif de l'air qui peut être naturel (courant d'air) ou forcé (ventilateur). Bien sûr, si l'air est plus chaud que la température cutanée alors la convection provoque un réchauffement du corps. C'est pour cette raison que l'utilisation d'un ventilateur en été ne nous rafraîchit que si la température ambiante ne dépasse pas la température cutanée (environ 32 °C). Le phénomène peut être considérablement modifié avec les vêtements qui peuvent réduire, voire empêcher, le phénomène de convection.

Le rayonnement (ou transfert radiatif) désigne le phénomène d'émission ou de transmission d'énergie sous formes d'ondes ou de particules. Dans le cas du confort thermique en intérieur, il existe deux échanges radiatifs possibles. D'une part, l'homme émet un rayonnement infrarouge et dissipe de l'énergie, d'autre part, il reçoit un rayonnement infrarouge provenant des objets chauds qui l'entourent (mobilier, murs...). L'énergie radiative échangée par un corps dépend de son émissivité et de sa température de surface (température de la surface externe du vêtement chez l'homme). Si le rayonnement émis par l'homme est supérieur au rayonnement reçu, le corps se refroidit, dans le cas inverse, il se réchauffe.

L'évaporation est le phénomène de transfert de chaleur dû au changement d'état de l'eau. Lorsque la température ambiante est élevée, ou que l'on effectue un travail musculaire important, de la sueur est sécrétée à la surface de la peau et le corps perd de la chaleur sous forme latente lorsque celle-ci s'évapore. La quantité de sueur sécrétée est déterminée par le système de thermorégulation dans le but de conserver l'équilibre thermique du corps. Ce phénomène d'évaporation de la sueur ne dépend pas directement de la température ambiante mais bien de la température de la peau. En revanche, l'amplitude du phénomène décroît lorsque l'humidité de l'air augmente et le phénomène est nul lorsque l'air est saturé en eau.

Pendant la respiration, le corps échange de la chaleur avec l'air inhalé. Cette chaleur est échangée sous forme sensible de par le phénomène de convection entre l'intérieur du corps et l'air (c'est pourquoi l'air expiré est plus chaud que l'air inspiré) mais aussi sous forme latente, l'air exhalé étant presque saturé. L'amplitude de l'échange dépend des différences de température et d'humidité entre l'air inhalé (i.e. l'air ambiant) et l'air exhalé ainsi que du débit respiratoire.

L'échange de chaleur entre l'individu et l'ambiance s'effectue donc selon différents mécanismes. Les équations caractérisant ces phénomènes ne sont pas rappelées ici³³.

Les pertes de chaleur sont de l'ordre de 120 W dans des conditions de température de 18-30 °C, pour un individu au repos (en air calme), et peuvent aller jusqu'à 500 W dans des conditions physiques soutenues (METLTM, 2003).

³³ Elles peuvent être retrouvées dans (ASHRAE, 1993).

L'importance relative des phénomènes d'échange de chaleur dépend de nombreux paramètres (températures de l'air, température radiante, vitesse d'air, vêture...). Gay (2001) a tracé la répartition des échanges de chaleur d'un sujet en fonction de la température ambiante, toute chose égale par ailleurs (Figure 2.2). Il apparaît que le phénomène de conduction a une amplitude limitée par rapport aux autres, que les pertes de chaleur augmentent lorsque la température diminue, que l'évaporation est le mode essentiel de dégagement pour des températures élevées (ici au dessus de 30 °C), et que pour des températures moyennes (22 - 26 °C), les échanges par rayonnement, par convection-conduction et par évaporation sont sensiblement égaux.

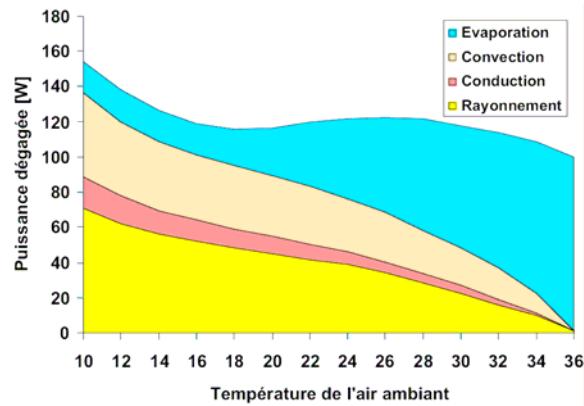


Figure 2.2. Répartition des échanges de chaleur d'une personne en fonction de la température ambiante, supposée homogène (Gay, 2001).

Equation du bilan thermique

Comme nous l'avons vu dans les parties précédentes, le métabolisme est dissipé en travail et en chaleur. Cette dernière peut-être dissipée dans l'environnement ambiant *via* les phénomènes présentés (convection, respiration...) ou stockée à l'intérieur du corps. Le bilan thermique de l'homme peut alors s'écrire sous la forme de l'équation (1.2) (ASHRAE, 1993).

$$M - W = (C + R + E_{sk}) + (E_{res} + C_{res}) + S_{sk} + S_c \quad (2.1)$$

Avec (les flux de chaleurs sont calculés par unité de surface corporelle) :

C_{res} : échanges de chaleur par convection lors de la respiration [W/m²]

E_{res} : échanges de chaleur par évaporation lors de la respiration [W/m²]

E_{sk} : échanges de chaleur par évaporation [W/m²]

C : flux de chaleur convectif, en Watt par m² de surface d'échange [W/m²]

M : métabolisme [W/m²]

W : travail extérieur [W/m²]

R : flux de chaleur par rayonnement [W/m²]

S_{sk} : chaleur stockée dans la peau [W/m²]

S_c : chaleur stockée à l'intérieur du corps [W/m²]

Ce type de bilan, développé par Gagge et *al.* (1941, 1986), est établi en condition transitoire. En effet, les chaleurs stockées y sont exprimées comme proportionnelles aux dérivées des températures (de peau, d'intérieur) en fonction du temps. Une partie du métabolisme (noté W) est utilisée par les muscles pour le travail externe et ne contribue donc pas au maintien de l'équilibre thermique. Celle-ci est quasiment nulle pour les activités classiques de bureau.

2.1.1.3. Le lien entre psychologie et confort thermique

Si la majorité des auteurs abordent le confort thermique uniquement à partir des points de vue physiologique et physique (Givoni, 1978)³⁴ (Fanger, 1970), de nombreux travaux ont montré que le confort était aussi lié à des facteurs psychologiques.

Rohles (1980) a par exemple observé que dans une cellule climatique aménagée et décorée, les sujets avaient plus chaud que dans la même cellule non transformée. Ses expériences mettent également en évidence le phénomène d'anticipation. Ainsi, en indiquant aux sujets qu'ils se situent dans une salle où la température est de 23,3 °C, il n'a pas observé de différences significatives sur le confort ressenti,

³⁴ Givoni présente le confort comme les conditions pour lesquelles les mécanismes d'autorégulation sont à un niveau d'activité minimale.

que la température soit réellement égale à 23,3 °C ou qu'elle soit inférieure (22,2 °C, 21,1 °C ou 20 °C). De même, il a comparé les sensations thermiques exprimées par des secrétaires travaillant dans un local où un chauffage radiatif avait été installé. Un groupe avait été prévenu que le chauffage était allumé, un autre n'avait pas été prévenu mais le chauffage était également en marche et un troisième groupe n'avait reçu aucune information et le chauffage était éteint. Cette étude a montré que les sujets avaient plus chaud lorsqu'ils savaient que le chauffage fonctionnait. Rohles et Wells (1977) ont également mis en évidence que les sujets avaient plus chaud dans un environnement de couleur rouge que dans un environnement de couleur bleue.

Concernant les deux théories utilisées dans les normes actuelles d'évaluation du confort thermique, l'approche analytique (détaillée en section 2.1.2) se cantonne aux phénomènes physiques et physiologiques alors que l'approche adaptative (détaillée en section 2.1.3) prend aussi en compte le facteur psychologique.

2.1.2 Présentation de l'approche analytique

2.1.2.1. Les indices développés par Fanger (1970)

Présentation du vote de confort moyen prévisible, PMV (Predicted Mean Vote)

Le vote de confort moyen est par définition la moyenne des votes émis par un ensemble de sujets situés dans des conditions climatiques données. Ces votes sont exprimés sur l'échelle de sensation thermique de l'ASHRAE, allant de -3 à 3 (Tableau 2.1).

Tableau 2.1. Echelle de sensation thermique utilisée par l'ASHRAE (2004)

Vote	-3	-2	-1	0	1	2	3
Sensation thermique	Froid	Frais	Légèrement froid	Neutre	Légèrement tiède	Tiède	Chaud

Fanger (1970) a cherché à corréler la valeur du bilan thermique au vote de confort moyen exprimé par les sujets exposés à des conditions thermiques données. Le bilan thermique est la différence entre la chaleur produite et les pertes à l'environnement. La formulation de ce bilan, développée par Fanger sous la forme de l'équation (2.2), provient de l'expression analytique des différents phénomènes d'échange de chaleur présentés dans la partie 2.1.1.2 et repose sur certaines hypothèses fondamentales que nous étudierons dans la partie 2.1.2.2. Au final, le bilan thermique dépend de deux variables humaines (la vêtue et le métabolisme) et de quatre variables d'ambiance intérieure (la vitesse d'air, la température de l'air, la température radiative et la pression partielle de vapeur de l'air).

$$\begin{aligned}
 B = & (M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot (5733 - 6,99 \cdot (M - W) - P_a) - 0,42 \cdot (M - W - 58,15) \\
 & - 0,0014 \cdot M \cdot (34 - T_a) - 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5867 - P_a) \\
 & - 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot (T_{cl}^4 - \bar{T}_r^4) - f_{cl} \cdot h_c \cdot (T_{cl} - T_a)
 \end{aligned} \quad (2.2)$$

T_{cl} , température de surface externe du vêtement, étant déterminée à partir de l'équation (2.3).

$$T_{cl} = 35,7 - 0,028(M - W) - 0,155 \cdot I_{cl} (3,96 \cdot 10^{-8} f_{cl} (T_{cl}^4 - \bar{T}_r^4) + f_{cl} \cdot h_c \cdot (T_{cl} - T_a)) \quad (2.3)$$

Avec : M : métabolisme [W/m²]

W : travail extérieur [W/m²]

t_a : température de l'air ambiant [°C]

P_a : pression partielle de vapeur d'eau de l'air ambiant [Pa]

\bar{T}_r : température radiante moyenne [°C]

T_{cl} : température de surface externe du vêtement [°C]

h_c : coefficient d'échange par convection [W/m².K]

f_{cl} : facteur d'habillement³⁵

Fanger a mené des enquêtes sur des groupes de sujets situés dans des chambres climatiques. Il a ainsi mis en évidence une corrélation entre la valeur du bilan thermique et le vote moyen des sujets exposés à des conditions climatiques données (équation (2.4)).

$$PMV = (0,303 \cdot e^{-0,036 \cdot M} + 0,028) \cdot B \quad (2.4)$$

Avec : M, le métabolisme [W/m²] et B, la valeur du bilan thermique [W/m²] qui peut être déterminée à partir de l'équation (2.4).

Selon cette équation, lorsque le bilan thermique est nul (le métabolisme est égal aux pertes thermiques), le PMV est nul également et la situation de confort est optimale (neutre sur l'échelle ASHRAE - Tableau 2.1).

Présentation du pourcentage prévisible d'insatisfaits, PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied)

Le pourcentage prévisible d'insatisfaits (PPD) est un deuxième indice introduit par Fanger. L'auteur suppose tout d'abord que les personnes votant -3, -2, +2 ou +3 sur l'échelle de l'ASHRAE (Tableau 2.1) sont insatisfaites des conditions de l'ambiance thermique. A partir d'enquêtes sur des groupes de sujets situés dans des chambres climatiques, Fanger a établi l'équation (2.5) qui relie le pourcentage d'insatisfaits (au sein d'une population) au vote moyen (PMV). Selon cette formule, le degré d'insatisfaction est identique pour un même vote exprimé en chaud ou en froid et il subsiste au minimum 5 % d'occupants insatisfaits.

$$PPD = 100 - 95 \cdot e^{-(0,03353 \cdot PMV^4 + 0,2179 \cdot PMV^2)} \quad (2.5)$$

2.1.2.2. Hypothèses fondamentales

Le PMV est une corrélation entre le vote moyen et le bilan thermique alors que le PPD est une corrélation entre le pourcentage de votes supérieur ou égal à deux et le PMV. Si la représentativité de la population et le nombre de sujets qui ont permis de déterminer ces formules ont quelque fois été critiqués, seules sont examinées ici les hypothèses fondamentales faites par l'auteur pour le calcul du bilan thermique.

Etudes expérimentales menées en conditions homogènes et stationnaires

Fanger a procédé à plusieurs études expérimentales afin de déterminer les relations suivantes :

- l'expression de la température cutanée moyenne et du taux d'évaporation en fonction du métabolisme (voir ci-après),
- l'expression du PMV en fonction du bilan thermique,
- l'expression du PPD en fonction du PMV.

Toutes ces expériences ont été effectuées en chambres climatiques, c'est à dire dans des conditions homogènes et stationnaires.

Un bilan thermique en situation proche de la neutralité thermique

La neutralité thermique (la création de chaleur est égale aux pertes à l'environnement) est une condition nécessaire pour assurer le confort thermique. En effet, si elle n'est pas respectée, la température centrale de l'homme augmente ou diminue et l'homéothermie n'est plus respectée. En situation de neutralité thermique, les mécanismes de thermorégulation ne sont pas sollicités (ni frisson, ni vasodilatation).

³⁵ Le facteur d'habillement est la proportion de la surface du corps nu par rapport à la surface du corps habillé (il vaut 1 pour un sujet nu). En pratique, il peut être évalué de plusieurs façons : méthode photographique, tables de valeur, équations simplifiées... Une méthode de détermination de ce facteur peut être trouvée dans la norme ISO 7730 (CEN, 2005).

Lorsque Fanger (1970) établit le bilan thermique sous la forme de l'équation (2.6), il néglige les termes de stockage de chaleur et considère donc que le corps est proche de la neutralité thermique. L'équation obtenue est stationnaire contrairement à l'équation (1.2) qui exprimait de façon générale le bilan thermique.

$$M - W = (C + R + K + E_{sk}) + (E_{res} + C_{res}) \quad (2.6)$$

Expressions de la température cutanée moyenne et du taux de sudation

Proche de la neutralité thermique, la température cutanée moyenne et le taux de sudation sont les seuls paramètres physiologiques influençant le bilan thermique. En plus de l'équilibre thermique, Fanger rajoute deux conditions d'obtention du confort que sont les relations de la température cutanée moyenne (équation (2.7)) et des échanges de chaleur par sudation (équation (2.8)) en fonction du métabolisme, dans les conditions de neutralité thermique. Ces équations ont été obtenues à partir d'expériences menées en chambres climatiques sur des sujets se considérant comme confortables (donc nécessairement en situation de neutralité thermique).

$$T_{sk} = 35,7 - 0,028 \cdot (M - W) \quad (2.7)$$

$$E_{rsw} = 0,42 \cdot (M - W - 58,15) \quad (2.8)$$

Méthodologie suivie par Fanger pour déterminer les indices PMV et PPD

La méthodologie suivie par Fanger pour déterminer les indices PMV/PPD est schématisée Figure 2.3.

Que ce soit pour l'expression du bilan thermique ou pour la détermination expérimentale de la température cutanée moyenne et du taux de sudation en fonction du métabolisme, Fanger se place en condition de neutralité thermique. Aussi le bilan thermique n'a-t-il que peu de sens physique lorsque l'on s'éloigne de la neutralité thermique. Ceci ne remet pas en cause le PMV qui est une corrélation mise en évidence expérimentalement.

D'autre part, tout le travail expérimental a été mené en chambres climatiques, c'est à dire en conditions stationnaires et homogènes. L'utilisation de ces résultats dans d'autres conditions climatiques n'est donc pas nécessairement fondée.

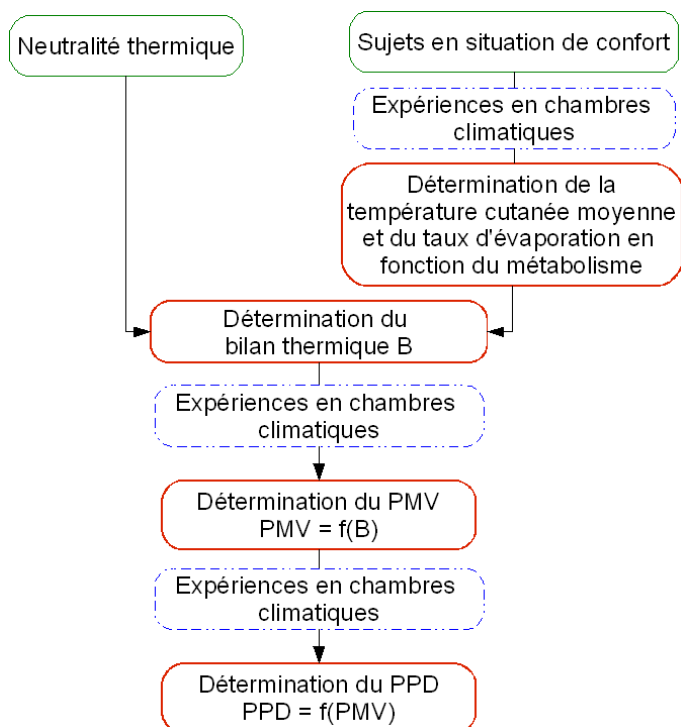


Figure 2.3. Méthodologie suivie par Fanger pour déterminer les indices PMV et PPD

2.1.2.3. Analyse critique de l'approche analytique

Aperçu des points fort de l'approche analytique

L'approche analytique a été validée expérimentalement à de nombreuses reprises, que ce soit dans des chambres climatiques ou dans des locaux climatisés. Fanger (1970) a lui-même comparé son indice PMV avec des résultats expérimentaux portant sur 1300 sujets (européens et nord américains). Par la suite de nombreux travaux ont confirmé cette théorie dans différentes configurations (climats, saisons...) : (Nevins *et al.*, 1966), (Mc Nall *et al.*, 1967), (Tanabe *et al.*, 1987), (Schiller *et al.*, 1988), (de Dear *et al.*, 1991), (Donini *et al.*, 1996), (de Dear *et al.*, 1996), (Cena *et de Dear*, 1998)...

Fanger (1970) a mené des expériences complémentaires pour étudier si certains paramètres physiques ou géographiques pouvaient influencer la sensation de confort (âge, sexe, origine géographique, heure du jour...). Les conclusions furent négatives pour l'ensemble des facteurs et l'équation de confort s'applique, d'après Fanger, à tous les sujets.

Un point fort de l'indice réside dans le fait que le PMV est basé sur l'équation complète du bilan thermique et prend donc en compte tous les paramètres de confort (que ce soit l'ambiance intérieure ou les caractéristiques des occupants). Sa complexité est relative puisqu'il est possible de calculer cet indice à partir d'abaques et d'un algorithme de calcul, simples d'utilisation et directement accessibles dans la norme ISO 7730 (CEN, 2005) par exemple.

Aperçu des points faibles et des limites de l'approche analytique

D'après l'équation (2.5) reliant le PPD au PMV, il y a au minimum 5 % des occupants insatisfaits par les conditions thermiques. Cette valeur a été remise en cause par certains auteurs tels que Brager (1992), Nicol et Humphreys (2006) qui proposent des valeurs de l'ordre, respectivement, de 12 % et 14 % d'occupants insatisfaits.

D'autre part, la prise en compte des effets hygrothermiques engendrés par la vêtue est très schématique. Celle-ci est représentée comme une couche uniforme d'isolation entre le corps et l'environnement ayant une température de surface unique. Outre que les vêtements ne sont pas uniformes, certains phénomènes ne sont pas pris en compte :

- la ventilation intérieure : lorsque des vêtements amples sont utilisés, les pertes de chaleur par évaporation augmentent car l'air est mis en circulation à travers le vêtement par les mouvements du corps,
 - l'absorption de l'humidité : le vêtement absorbe l'excès d'humidité au voisinage de la peau. Cette part d'humidité s'évapore depuis le vêtement et non depuis la peau, ce qui réduit les pertes de chaleur latente du corps en situation chaude,
 - la transmission de l'humidité : le vêtement affecte le refroidissement par évaporation car il introduit une résistance supplémentaire à la diffusion de la vapeur d'eau depuis la peau.
- L'importance de cet effet dépend de la perméabilité du vêtement à l'humidité.

La détermination des indices de Fanger nécessite de connaître la vêtue et l'activité des occupants (pour évaluer leur métabolisme). Ceci peut poser problème lorsque les habitudes vestimentaires et les activités pratiquées diffèrent selon les occupants d'un même local. De plus, les vêtements ne sont pas portés uniquement dans le but d'assurer le confort thermique. La nature de ceux-ci sont influencés par différents facteurs (la mode, le sexe, l'activité, le climat extérieur...) et la nécessité de spécifier une valeur d'isolation peut s'avérer être une source d'incertitude quant à la sensation de confort réellement perçue par les occupants.

De nombreuses études de terrain ont étudié la pertinence des indices PMV/PPD dans les bâtiments non climatisés. Dans ces bâtiments, où les conditions intérieures sont directement liées à l'environnement extérieur, l'intervalle de confort serait plus grand que celui obtenu avec les indices PMV/PPD. Selon Nicol et Humphreys (2002), le PMV ne prédit pas précisément le vote des occupants sur l'échelle ASHRAE (Tableau 2.1) et les sensations de chaleur en période estivale sont notamment surestimées. Les enquêtes menées par de Dear et Brager (1998) dans des locaux non climatisés révèlent le même phénomène : la température de confort observée lorsque la température extérieure est de 30 °C est 1,5 °C plus élevée que celle prévue par les indices de Fanger.

Les causes de cette différence ne sont pas uniquement dues aux erreurs de mesures et aux incertitudes existantes sur certains paramètres (vêture, activité). Nicol et Humphreys (2002) expliquent que les indices PMV/PPD sont basés sur des réponses de sujets situés dans des conditions climatiques constantes et homogènes (chambres climatiques), ce qui est loin d'être le cas dans les bâtiments non climatisés. Dans un autre article, Nicol et Humphreys (1973) suggèrent que cette différence provient des possibilités d'adaptation qui existent sur le terrain face aux conditions climatiques et qui augmentent les plages de confort des occupants. Cette dernière idée est à la base de la théorie adaptative que nous étudierons en détail dans la partie 2.1.3.

2.1.2.4. Utilisation de l'approche analytique dans la norme EN 15251

Dans la norme EN 15251 (CEN, 2007), la définition des ambiances thermiques recommandées est basée sur l'approche analytique avec l'utilisation des indices PMV et PPD. Toutefois, dans le cas des bâtiments non climatisés, il existe aussi une méthode optionnelle qui peut être utilisée pour l'évaluation du confort sous certaines conditions. Nous reviendrons sur cette méthode en partie 2.1.3.3.

Détermination et conditions d'utilisation des indices PMV/PPD

En ce qui concerne le calcul et l'utilisation des indices PMV/PPD, la norme EN 15251 fait appel à la norme EN ISO 7730³⁶ (CEN, 2006) qui comprend un algorithme de calcul ainsi que les données nécessaires à ce calcul (méthode de détermination du facteur de vêture, du métabolisme...). Cette norme recommande d'utiliser ces indices uniquement sous les conditions rappelées dans le Tableau 2.2.

Tableau 2.2. Intervalles recommandés lors de l'utilisation des indices PMV/PPD (CEN, 2006)

Paramètres	Valeur minimale	Valeur maximale
PMV	-2	+2
Métabolisme	0.8 Met	4 Met
Résistance thermique du vêtement	0 clo	2 clo
Température de l'air ambiant	10 °C	30 °C
Température moyenne de rayonnement	10 °C	40 °C
Vitesse relative de l'air	0 m/s	1 m/s
Pression partielle de vapeur d'eau	0 Pa	2700 Pa

Plages de confort recommandées en fonction des indices PMV/PPD

Dans la norme EN 15251, les plages de confort recommandées sont données pour les différentes catégories de niveau de confort décrites dans le Tableau 2.3.

Tableau 2.3. Description des catégories de niveau de confort utilisées dans la norme EN 15251

Catégorie	Explication
I	Niveau élevé attendu qui est recommandé pour les espaces occupés par des personnes très sensibles et fragiles avec des exigences spécifiques comme des personnes handicapées, malades, de très jeunes enfants et des personnes âgées.
II	Niveau normal attendu qu'il convient d'utiliser pour les bâtiments neufs et les rénovations.
III	Niveau modéré acceptable attendu qui peut être utilisé dans les bâtiments existants.
IV	Valeurs en dehors des critères des catégories ci-dessus. Il convient que cette catégorie soit acceptée seulement pour une partie restreinte de l'année

³⁶ Ergonomie des ambiances thermiques – Détermination analytique et interprétation du confort thermique par le calcul des indices PMV et PPD et par des critères de confort thermique local.

Les plages de confort recommandées (basées sur les indices PPD et PMV) sont indiquées dans le Tableau 2.4 pour les différentes catégories d'ambiance.

Tableau 2.4. Plages de confort recommandées dans la norme EN 15251

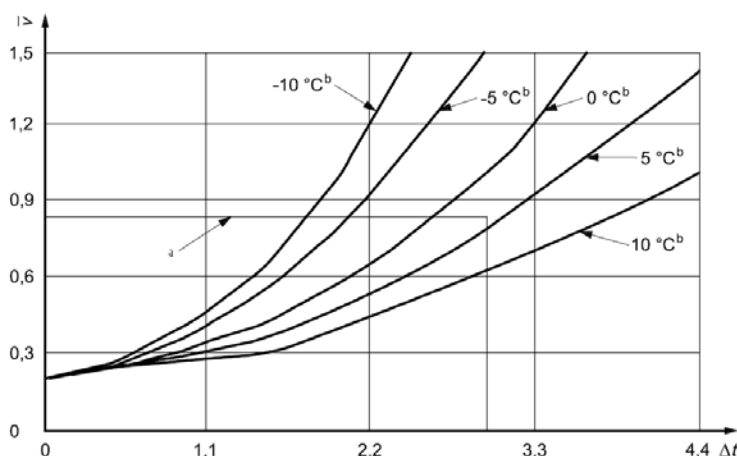
Catégories	Etat thermique global du corps	
	PPD [%]	PMV
I	< 6	$-0,2 < PMV < 0,2$
II	< 10	$-0,5 < PMV < 0,5$
III	< 15	$-0,7 < PMV < 0,7$
IV	> 15	$PMV < -0,7$; ou $PMV > 0,7$

En utilisant une combinaison d'hypothèses concernant l'activité et la vêtue des occupants, l'humidité et les vitesses d'air, il est possible d'exprimer les critères de confort précédents sous la forme d'une plage de température opérative. Le Tableau 2.5, issu de la norme EN 15251, présente les plages de confort basées directement sur la température intérieure opérative pour différentes valeurs d'activité et de vêtue. Leur détermination repose sur l'hypothèse d'une humidité relative de 50 % et de vitesses d'air faibles.

Tableau 2.5. Exemples de températures intérieures de base recommandées pour la conception des bâtiments et des systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation (CEN, 2007)

Types de bâtiment ou d'espace	Catégories	Température opérative [°C]	
		Minimum pour le chauffage Vêtue ~ 1 clo	Maximum pour le rafraîchissement Vêtue ~ 0,5 clo
Bâtiments d'habitation, pièces de séjour Activité sédentaire ~ 1,2 met	I	21	25,5
	II	20	26
	III	18	27
Bureaux (individuels, paysagés) et locaux à activité similaire (salles de réunion...) Activité sédentaire ~ 1,2 met	I	21	25,5
	II	20	26
	III	19	27

L'influence des vitesses d'air est intégrée dans les indices PMV/PPD et donc dans les plages de confort définies à partir de ceux-ci. La Figure 2.4, qui provient de la norme EN ISO 7730 (CEN, 2006), permet de prendre en compte ces vitesses lorsque les plages de confort directement basées sur la température opérative sont utilisées. Cette figure indique l'amplitude admissible d'augmentation de la température en fonction de la vitesse de l'air pour une tenue vestimentaire estivale (0,5 clo) et pour une activité sédentaire (1,2 met). Le point de référence de ces courbes est une température opérative de 26 °C et une vitesse de l'air égale à 0,20 m.s⁻¹.



a : limite pour une activité légère essentiellement sédentaire

b : différence entre la température moyenne de rayonnement et la température de l'air ($t_r - t_a$)

\bar{v} : vitesse moyenne de l'air (m/s)

Δt : augmentation de la température opérative au dessus de 26 °C

Figure 2.4. Vitesse de l'air requise pour compenser une augmentation de température (CEN, 2006)

2.1.3 L'approche adaptative

2.1.3.1. Principes généraux de l'approche adaptative

Le principe adaptatif est énoncé en ces termes par Humphreys et Nicol (1998) : « si une modification des conditions climatiques se produit et provoque de l'inconfort, les personnes entreprendront des actions visant à rétablir leur confort »³⁷. De Dear et Brager (1998) classent les actions d'adaptation envisageables en trois catégories : comportementales, physiologiques et psychologiques. Celles-ci sont présentées ci-après.

Ainsi, si l'approche analytique peut être qualifiée de linéaire au sens où les conditions climatiques déclenchent des réponses physiologiques qui modifient la sensation de confort ou d'inconfort du sujet, l'approche adaptative, qui considère l'occupant comme actif face à des conditions qu'il juge inconfortables, peut être représentée par le biais de boucles rétroactives sur la chaîne linéaire de l'approche analytique (Figure 2.5).

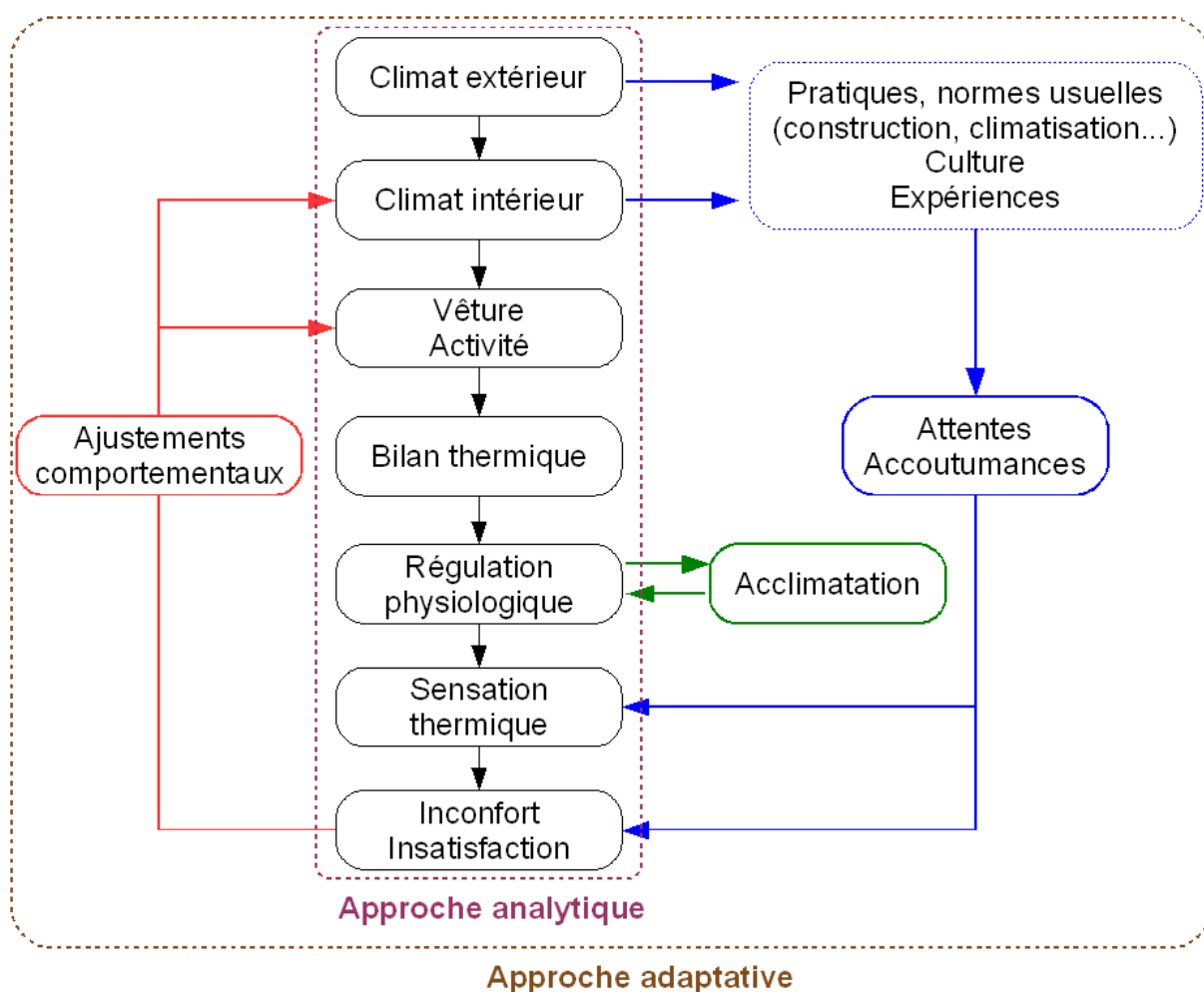


Figure 2.5. Représentation des mécanismes d'adaptation

³⁷ « If a change occurs such as to produce discomfort, people react in ways which tend to restore their comfort ».

Ajustements comportementaux

Nicol (2008) a recensé les différents leviers d'ajustements comportementaux dont bénéficient les occupants. Ceux-ci peuvent consister à :

- réduire le métabolisme interne : c'est un phénomène qui peut être provoqué consciemment (sauter sur soi-même quand il fait froid) ou inconsciemment (frissons),
- réduire ou augmenter les pertes de chaleur du corps : c'est un phénomène qui peut être provoqué consciemment (changer de vêture) ou inconsciemment (sudation),
- adapter l'environnement thermique (ouverture d'une fenêtre),
- changer d'environnement thermique (ne pas rester sous un rayonnement direct du soleil).

Toutes ces adaptations peuvent se diviser en deux catégories, celles qui permettent d'adapter la température de confort (vêture, activité) pour se sentir confortable dans les conditions existantes et celles qui modifient les conditions existantes. La quantité et la nature des ajustements comportementaux possibles dépendent de la situation dans laquelle se trouve l'occupant (bâtiment, codes vestimentaires, capacité d'avoir accès au thermostat, à un ventilateur de table...).

Acclimatation (adaptation physiologique)

De Dear et Brager (1998) expliquent que l'acclimatation est un phénomène qui ne modifie que très sensiblement la situation des occupants lors d'une période de froid prolongée. En revanche, face à une période de chaleur prolongée, la première réponse physiologique est une augmentation de la production de sueur (pour une puissance de chaleur donnée) ainsi qu'une diminution de la température à partir de laquelle la sudation se déclenche. De plus, la répartition de la sueur sur la peau est meilleure chez une personne acclimatée que chez une personne qui ne l'est pas. Des phénomènes cardiovasculaires peuvent aussi se manifester tels que la réduction du rythme cardiaque et l'augmentation du volume et du débit sanguin. Ainsi, l'acclimatation est un phénomène effectué inconsciemment qui permet de ressentir comme confortables des conditions climatiques qui auraient été jugées inconfortables auparavant. Selon de Dear et Brager (2002), la plupart des études expérimentales montrent que ce phénomène n'a que peu d'influence sur les conditions de confort thermique de sujets en activité légère dans les conditions généralement rencontrées dans les résidences ou les bureaux.

Accoutumance (adaptation psychologique)

L'adaptation psychologique englobe les effets des variables culturelles et cognitives. Des études ont montré dans quelles mesures les habitudes et les attentes peuvent modifier la perception de confort (par exemple les expériences de Rohles déjà présentées dans la partie 2.1.1.3). Fishman et Pimbert (1982) ont montré à partir d'enquêtes menées dans des bureaux du Royaume-Uni, que les occupants des bâtiments non climatisés ont une plus grande tolérance aux variations des conditions intérieures que les occupants des bâtiments climatisés. Ces derniers sont peu tolérants aux températures élevées car ils attendent un environnement thermique homogène. Rohles et *al.* (1977) ont étudié une population composée d'habitants du Michigan et d'habitants du Texas. Ils ont montré que les sujets du Michigan étaient plus tolérants aux températures d'été élevées que les sujets texans. Il est suggéré que les Texans, considérant la climatisation comme normale, attendent, voire exigent, des températures plus fraîches que leurs compatriotes du nord du pays.

Facteurs limitatifs des possibilités d'adaptation

L'approche adaptative ne se base donc pas sur un bilan thermique du corps humain prenant en compte les échanges d'énergie avec l'environnement, mais sur l'observation qu'il existe un nombre significatif d'actions que l'occupant peut effectuer (et effectue) pour atteindre une sensation de confort thermique. Selon cette théorie, la sensation de confort thermique n'est donc pas uniquement régie par la physique et la physiologie. Plus le bâtiment est équipé de moyens d'adaptation et plus l'occupant est susceptible d'y éprouver du confort. D'après Nicol et Humphreys (2009), si nous étions libres d'utiliser tous ces leviers d'action, le confort thermique ne serait pas un problème. Le problème naît du fait qu'il existe de nombreuses contraintes limitant notre capacité à entreprendre l'une ou l'autre de ces actions. La mode, les habitudes sociales, la législation, ou encore l'absence de contrôle direct sur son environnement (la température de consigne dans les bureaux est parfois fixée sans l'avis des occupants) sont des exemples de contraintes qui limitent les possibilités d'adaptation.

2.1.3.2. Mise en évidence de la théorie adaptative

Processus expérimental

La mise en évidence du processus adaptatif repose sur la réalisation d'enquêtes d'évaluation du confort thermique menées sur le terrain, c'est à dire dans des bâtiments *in-situ*. Ces enquêtes permettent de collecter à la fois des paramètres concernant l'ambiance thermique (températures, humidité...) et les réponses de sensation thermique des occupants (par exemple sur l'échelle présentée dans le Tableau 2.1) qui se trouvent dans des situations réelles de la vie quotidienne. Un traitement statistique permet alors de déterminer les températures, ou les combinaisons de plusieurs variables thermiques (température, humidité, vitesse de l'air), qui sont ressenties comme confortables par les occupants interrogés.

Mise en évidence du processus adaptatif

A partir d'enquêtes de terrain, de nombreuses études ont vérifié que la température de confort était liée aux conditions climatiques extérieures et notamment corrélée à la température extérieure. Humphreys (1978) a par exemple tracé la température de confort en fonction de la moyenne mensuelle des températures extérieures (Figure 2.6). Ces valeurs proviennent de nombreuses études menées à travers le monde (chaque point représente la valeur moyenne pour une étude). Il apparaît que l'influence du climat extérieur est moins marquée dans les bâtiments climatisés que dans ceux qui ne le sont pas. Pour ces derniers, les deux variables sont linéairement corrélées et une régression linéaire (équation (2.9)) entre la température de confort (T_c) et la moyenne mensuelle des températures extérieures (T_o) est proposée par l'auteur.

$$T_c = 11,5 + 0,534 \cdot T_o \quad (2.9)$$

Des équations linéaires de ce type ont ensuite été retrouvées à partir de différentes enquêtes (de Dear et Brager (2002), Humphreys et Nicol (2000)). D'autre part, des études supplémentaires ont montrées que les corrélations reliant la température de confort à une moyenne pondérée des températures extérieures (moyenne glissante) étaient plus précises que celles qui, à l'image de l'équation (2.9), prenaient en compte la moyenne mensuelle (Nicol et Raja, 1996).

De nombreux travaux suggèrent donc que la température de confort dans les locaux non climatisés peut être exprimée par une corrélation linéaire en fonction d'une moyenne mensuelle ou d'une moyenne glissante des températures extérieures. Cette équation traduit en quelque sorte une « boîte noire » (Nicol et Humphreys, 1998) recouvrant de nombreuses relations. Ainsi, la vêtue des occupants, l'utilisation des moyens de contrôle de l'environnement à l'intérieur du bâtiment (fenêtres, ventilateurs), la posture, etc., dépendent de la température extérieure. C'est la rétroaction entre le climat et ces actions adaptatives qui fait que seules les températures extérieures sont à considérer.

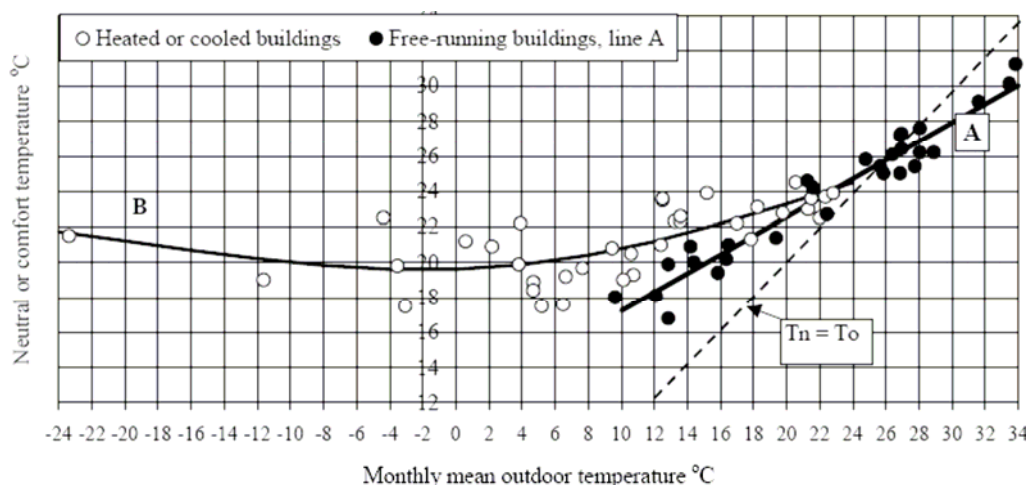


Figure 2.6. Evolution de la température de confort en fonction de la moyenne mensuelle des températures extérieures pour les bâtiments climatisés et non climatisés (Humphreys, 1978).

L'apparition d'un modèle adaptatif pour l'Europe

Le projet européen SCATs (Smart Controls and Adaptive Thermal comfort), lancé en 1997, avait pour objectif de déterminer des lois adaptatives pour les immeubles de bureau européens climatisés et non climatisés à partir d'études de terrain menées dans les 5 pays représentés dans le projet (France, Grèce, Portugal, Suède, Royaume Uni). La démarche suivie et les résultats sont présentés par McCartney et Nicol (2002a).

La Figure 2.7 présente, pour les bâtiments non climatisés, la température de confort en fonction d'une moyenne glissante des températures extérieures calculée à partir de l'équation (2.10). Les points représentent les résultats expérimentaux et la droite la régression effectuée en vue de définir une loi générale pour l'Europe.

$$T_{RM80} = 0,8 \cdot T_{RMn-1} + 0,2 \cdot T_{DMn-1} \quad (2.10)$$

Avec : T_{RMn-1} , la moyenne glissante au jour n-1 et T_{DMn-1} , la moyenne journalière au jour n-1

Les corrélations déterminées dans le cadre du projet SCATs entre la température de confort (T_C) et la moyenne glissante sont l'équation (2.11) pour les bâtiments non climatisés et l'équation (2.12) pour les bâtiments climatisés. La pente est moins forte pour les bâtiments climatisés que pour les autres car il y existe moins de moyens d'adaptation et les conditions intérieures y sont fortement découplées des conditions extérieures.

$$\begin{aligned} T_C &= 0,33 \cdot T_{RM80} + 18,8 & \text{si } T_{RM80} > 10^\circ \text{C} \\ T_C &= 22,1^\circ \text{C} & \text{si } T_{RM80} < 10^\circ \text{C} \end{aligned} \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned} T_C &= 0,09 \cdot T_{RM80} + 22,6 & \text{si } T_{RM80} > 10^\circ \text{C} \\ T_C &= 23,5^\circ \text{C} & \text{si } T_{RM80} < 10^\circ \text{C} \end{aligned} \quad (2.12)$$

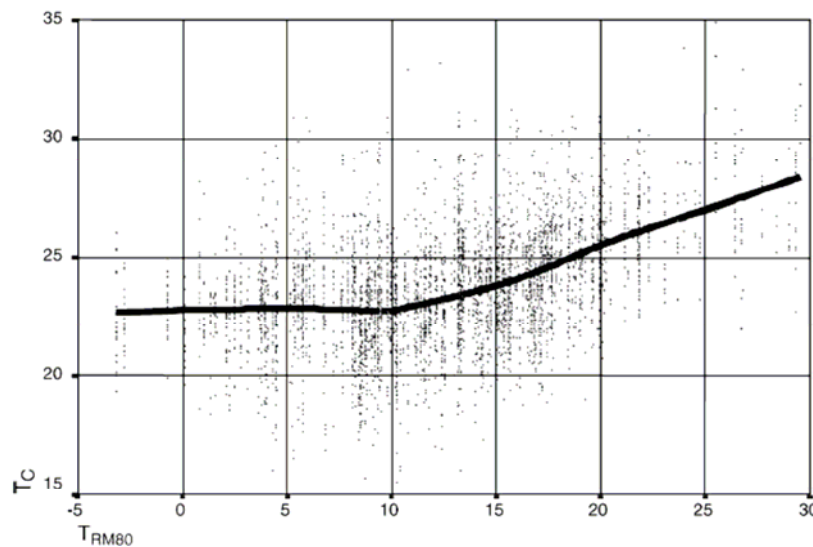


Figure 2.7. Températures de confort en fonction de TRM 80 (équation (2.10)) selon McCartney et Nicol (2002a)

Concernant les bâtiments non climatisés, l'application normative de la théorie adaptative repose sur les résultats du projet SCATs, avec notamment la réutilisation de l'équation (2.11). Nous y revenons dans la partie suivante.

2.1.3.3. Utilisation de l'approche adaptative dans la norme EN 15251

Dans la norme EN 15251 (CEN, 2007), les ambiances thermiques recommandées sont basées sur l'approche analytique avec l'utilisation des indices PMV et PPD (partie 2.1.2.4). Toutefois, dans le cas

des bâtiments non climatisés, il existe une méthode optionnelle qui peut être utilisée pour l'évaluation du confort thermique, à condition que le bâtiment respecte les exigences suivantes :

- Les occupants doivent avoir des activités quasi sédentaires avec un niveau métabolique compris entre 1,0 et 1,3 met.
- Il ne doit pas y avoir de règles strictes d'habillement à l'intérieur du bâtiment afin de permettre aux occupants d'adapter librement l'isolation thermique de leur vêtue.
- Les espaces doivent être équipés de fenêtres facilement ouvrables sur l'extérieur et dont l'ouverture peut être ajustée par les occupants des espaces³⁸.
- Aucune climatisation ne doit être en fonctionnement dans l'espace, l'ouverture des fenêtres doit être le moyen essentiel pour la régulation des conditions thermiques. Toutefois, cela n'empêche pas l'utilisation d'une ventilation mécanique d'air non conditionné ou de méthodes à basse énergie permettant un contrôle individuel de l'ambiance intérieure comme des ventilateurs, des volets, la ventilation nocturne etc.

Les températures intérieures opératives recommandées sont présentées sur la Figure 2.8 pour les 3 catégories de bâtiments décrites dans le Tableau 2.3. Elles dépendent de la température journalière en moyenne glissante Θ_{rm} , calculée selon l'équation (2.13) ou selon l'équation simplifiée (2.14).

$$\Theta_{rm} = (1 - \alpha) \cdot (\Theta_{ed-1} + \alpha \cdot \Theta_{ed-2} + \alpha^2 \cdot \Theta_{ed-3} + \dots) \quad (2.13)$$

$$\Theta_{rm} = (1 - \alpha) \cdot \Theta_{ed-1} + \alpha \cdot \Theta_{rm-1} \quad (2.14)$$

Avec :

Θ_{rm} , la température moyenne glissante du jour [°C]

Θ_{rm-1} , la température moyenne glissante de la veille [°C]

Θ_{ed-1} , la température moyenne journalière extérieure de la veille (Θ_{ed-2} , celle de l'avant veille) [°C]

α est une constant comprise entre 0 et 1. La valeur recommandée par la norme est 0,8.

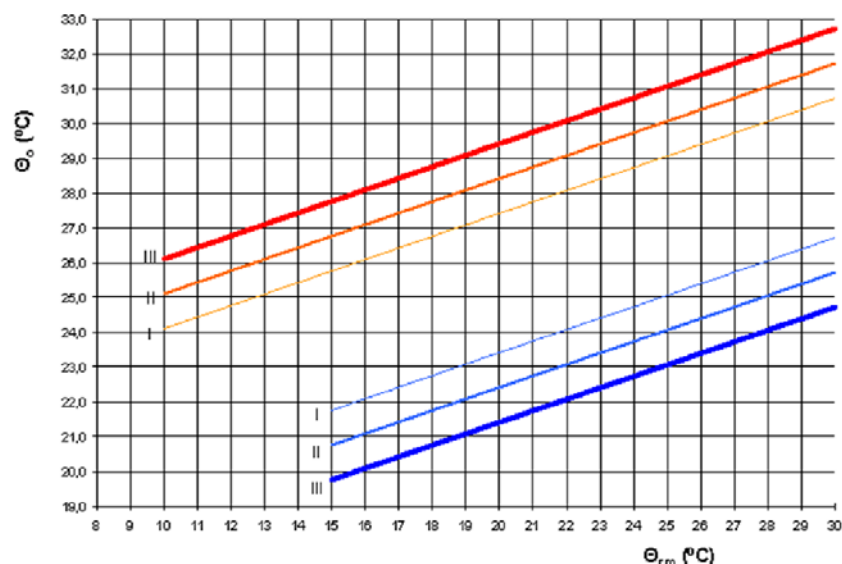


Figure 2.8. Valeurs de base de la température opérative intérieure pour des bâtiments non climatisés (en ordonnée) - fonction d'une température extérieure en moyenne glissante pondérée exponentiellement (en abscisse)

³⁸ Dans les bureaux paysagés où la plupart des occupants ont seulement un accès limité aux fenêtres ouvrables, l'approche adaptative ne peut pas toujours s'appliquer. D'ailleurs, dans le projet de norme de 2005 (CEN, 2005), une exigence supplémentaire était qu'il y ait moins de quatre personnes par pièce.

En dessous d'une température journalière extérieure en moyenne glissante de 10 °C, il faut utiliser, pour limite supérieure, les mêmes valeurs que pour les bâtiments climatisés. En dessous d'une température journalière extérieure en moyenne glissante de 15 °C, il faut utiliser, pour limite inférieure, les mêmes valeurs que pour les bâtiments climatisés.

Les températures opératives maximales autorisées pour la catégorie II ont été calculées pour 5 climats européens³⁹ et tracées sur la Figure 2.9. La température maximale autorisée peut atteindre 26,9 °C pour Stockholm et 29,9 °C pour Palerme. Le nombre de jours pendant lesquelles celle-ci dépasse 26 °C varie de 36 par an pour Stockholm à 226 par an pour Palerme.

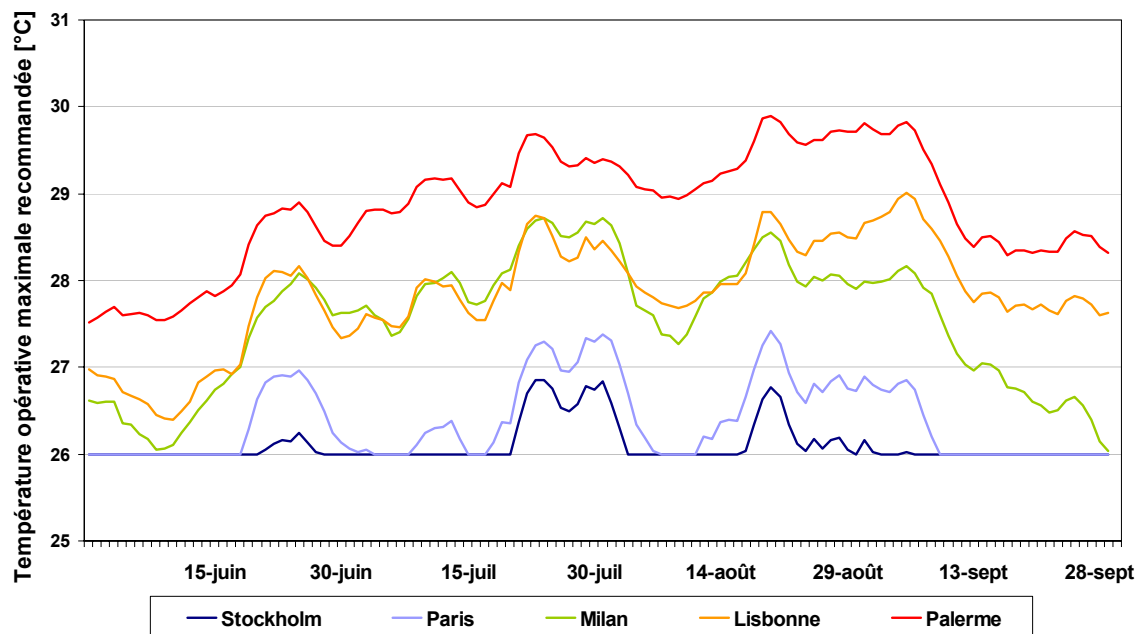


Figure 2.9. Températures opératives maximales autorisées (1^{er} juin - 30 septembre) d'après la méthode adaptative définie dans la norme EN 15251 et pour un niveau de confort de catégorie II

La Figure 2.8 tient déjà compte de l'adaptation de l'habillement des personnes. Dans le cas où l'occupant peut contrôler un dispositif générant la vitesse d'air locale (ventilateur, systèmes de ventilation personnels), les limites supérieures recommandées peuvent être augmentées de quelques degrés. La correction exacte de la température dépend des vitesses d'air générées par le ventilateur et peut être déterminée à partir de la Figure 2.10.

Il est mentionné dans la norme EN 15251 que la Figure 2.10 provient de la norme EN ISO 7730 (voir la Figure 2.4 et la section 2.1.2.4).

Aux Etats-Unis, l'ASHRAE (2004) a aussi intégré l'approche adaptative dans la norme qui précise les conditions du confort thermique. Nous avons mené une étude comparative de la prise en compte de la théorie adaptative dans les normes européenne et nord-américaine (Grignon-Massé et al., 2008a), mais celle-ci n'est pas présentée ici.

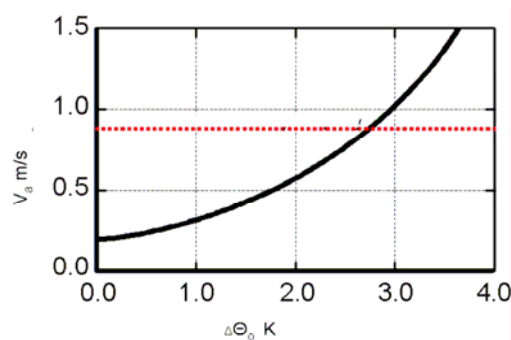


Figure 2.10. Vitesse d'air requise (V_a en m/s) pour compenser l'augmentation de la température opérative ($\Delta\Theta_o$ en K)

³⁹ Fichiers Meteonorm de format TM2.

2.1.3.4. Analyse critique de l'approche adaptative et de son application normative

Simplicité d'utilisation

Un avantage important de l'approche adaptative est sa simplicité d'utilisation. La connaissance des températures extérieures est suffisante pour déterminer des intervalles de températures opératives confortables ; il n'y a notamment pas d'hypothèse à faire concernant les occupants. Il est souvent reproché à cette approche de ne pas prendre en compte l'humidité (une même température opérative peut être perçue comme confortable ou inconfortable selon le taux d'humidité) mais il est rappelé dans la norme EN 15251 que pour les bureaux et les résidences, l'humidité a un effet minime sur le confort thermique en Europe⁴⁰.

Généralisation des résultats

Dans la norme EN 15251 (CEN, 2007), il est souligné que même si la théorie adaptative est essentiellement basée sur des études menées dans des bâtiments de bureaux, on peut supposer que les zones de confort peuvent s'appliquer à d'autres bâtiments où les activités sont principalement sédentaires (les logements par exemple).

Toutefois, la généralisation des résultats de l'étude SCATs à tous les bâtiments dans lesquels les activités sont sédentaires peut poser question. En effet, chaque bâtiment est un cas particulier avec des possibilités d'adaptation qui lui sont propres (ventilation mono-façade, ventilation traversante...). Les zones de confort devraient théoriquement dépendre des moyens d'adaptation et être plus sévères dans les bâtiments où les moyens sont limités. Nicol et Humphreys (2002) reconnaissent qu'il est difficile de généraliser les résultats des enquêtes de terrain mais n'apportent pas de piste de réflexion supplémentaire.

Prise en compte des vitesses d'air

Nous avons vu que la norme permettait d'augmenter la température maximale autorisée en prenant en compte les vitesses d'air (Figure 2.10), ce qui soulève deux problèmes.

La norme EN ISO 7730, d'où cette figure provient, spécifie que le point de référence utilisé pour la construction de cette dernière est 26 °C. La Figure 2.10 ne peut donc être utilisée, telle quelle, sans justification. A titre d'exemple, lorsque la température maximale autorisée est de 32 °C selon l'approche adaptative, la convection engendrée par des mouvements d'air est susceptible de réchauffer l'occupant (et non de le refroidir) car cette température est proche de celle de la peau.

D'autre part, l'augmentation des vitesses d'air, par la création de courants d'air ou l'utilisation d'un ventilateur de confort, est un moyen d'adaptation souvent disponible dans les bâtiments non climatisés. Lors des enquêtes de terrain menées dans le cadre du projet SCATs, certains occupants devaient probablement utiliser ce moyen d'adaptation et, en toute logique, celui-ci est déjà pris en compte dans la définition des zones de confort adaptatives.

Détermination de la température de confort à partir des enquêtes de terrain

Dans une communication (Grignon-Massé et al., 2008b), nous avons abordé en détail la méthodologie suivie pour déterminer les températures de confort à partir des enquêtes de terrain et les biais que celle-ci pouvait introduire. Nos conclusions principales sont présentées succinctement ici.

Dans le cadre du projet SCATs, la température de confort est calculée à partir de chaque vote d'occupant en utilisant l'équation (2.15). Selon McCartney et Nicol (2002a), qui décrivent le projet SCATs, cette équation provient de régressions définies par de Dear et Brager (1998) à partir d'enquêtes de terrain.

⁴⁰ "Humidity has only a small effect on thermal sensation and perceived air quality in the rooms of sedentary occupancy".

$$T_C = T_G - 2 \cdot (CV - 4) \quad (2.15)$$

Avec : T_C la température de confort, T_G la température opérative au moment où l'occupant a rempli le questionnaire et CV le vote de confort de l'occupant (de 1 (très froid) à 7 (très chaud) en passant par 4 (confortable)).

L'utilisation de l'équation (2.15) nous apparaît problématique pour les deux raisons suivantes :

- De Dear et Brager (1998) proposent en réalité deux équations selon que le bâtiment est climatisé ou qu'il ne l'est pas. L'équation utilisée dans SCATs correspond aux bâtiments climatisés (pour les bâtiments non climatisés, la pente est de -3,7 et non de -2), ce qui ne devrait pas être le cas.
- L'utilisation de cette régression, sans mentionner de conditions de validité, pose question. En effet, dans le cas où un occupant placé dans une ambiance à 40 °C répondrait qu'il a très chaud (7 sur l'échelle utilisée), la température de confort calculée à partir de cette équation serait de 34 °C alors que l'occupant aurait vraisemblablement encore trop chaud à cette température. Cette équation ne peut être appliquée quelles que soient les valeurs de T_G et CV (équation (2.15)).

Une réponse au premier problème a été apportée par Nicol (2009) qui a montré, a posteriori, que l'équation (2.15) peut être retrouvée à partir des données expérimentales du projet SCATs.

Qualité des régressions linéaires

La détermination de zones de confort adaptatives repose sur un important travail statistique et notamment sur de nombreuses corrélations. De façon générale, ces dernières ont des coefficients de corrélation assez faibles (0,383 par exemple pour la corrélation de la Figure 2.7) et sont souvent prolongées même lorsque le scientifique n'avait que peu de résultats expérimentaux. Ainsi, dans le cas des résultats présentés sur la Figure 2.7, est-il légitime de prolonger la régression ou de supposer l'existence d'un seuil lorsque T_{RM80} dépasse 22-23 °C ?

La qualité des corrélations linéaires peut être critiquée, elle transcrit aussi la difficulté de tirer des relations générales à partir de bâtiments qui sont tous des cas particuliers.

2.1.4 Conclusions

Les deux approches principales d'évaluation du confort thermique (l'approche analytique et l'approche adaptative) ont été présentées dans cette partie.

Dans cette étude, l'évaluation du service énergétique reposera sur les zones de confort telles que définies dans la présente norme d'évaluation du confort thermique, la norme EN 15251 (CEN, 2007), pour un niveau de confort de catégorie II (niveau normal attendu qu'il convient d'utiliser pour les bâtiments neufs et les rénovations.). Certains points problématiques soulevés à propos de l'approche adaptative auraient mérité d'être étudiées avec plus de détail mais ce n'était pas l'objet de cette thèse.

Pour les bâtiments climatisés, les valeurs par défaut basées sur l'approche analytique sont retenues. Pour des bâtiments de bureaux ou résidentiels, la température opérative maximale autorisée en été est alors de 26 °C.

En ce qui concerne les bâtiments non climatisés, la zone de confort adaptative de catégorie II (Figure 2.8) est retenue.

Ces zones de confort peuvent être étendues pour tenir compte de l'effet des vitesses d'air sur le confort (Figure 2.4 et Figure 2.10).

2.2 Aperçu des méthodes de monétisation des biens et services non marchands (externalités et coûts privés)

Il a été vu au chapitre 1 que l'application d'une méthode d'Analyse Coût Avantage ou Coût Efficacité nécessitait d'intégrer dans les calculs économiques des biens et des services non marchands tels que les externalités. Les principales méthodes de monétisation des biens et services non marchands sont succinctement présentées dans cette partie, elles se répartissent en deux catégories selon qu'elles sont basées sur l'expertise des dommages ou sur les préférences individuelles. Une description détaillée de ces méthodes a été commanditée par la Commission Européenne (2005a).

2.2.1 Les méthodes basées sur l'expertise des dommages (ou de la détérioration de bénéfices)

Méthode de monétisation des dommages physiques

La méthode de monétisation des dommages physiques consiste en une évaluation monétaire des dommages causés par une activité, par la détérioration (qualité, disponibilité) d'un bien ou service non marchand : santé des individus, baisse des récoltes, dégradation du parc de bâtiments... Il s'agit d'évaluer physiquement les dommages (taux de morbidité, taux de mortalité, évolution du rendement des récoltes...) puis d'évaluer le coût de chacun : coûts d'hospitalisation, manque à gagner engendré par une baisse des récoltes...

Méthode d'évaluation des coûts de remplacement

La méthode d'évaluation des coûts de remplacement consiste à évaluer les dépenses à engager pour remplacer la détérioration, la perte, d'un bien ou service non marchand. Ainsi, si une nappe d'eau potable devenait polluée et qu'il fallait investir dans l'installation de capacités de traitement, la valeur monétaire du bien environnemental que représente cette nappe d'eau potable correspondrait alors aux coûts d'installations de ces équipements.

2.2.2 Les méthodes basées sur les préférences individuelles (détermination du consentement à payer)

Le consentement à payer⁴¹ est le montant maximal qu'un individu est prêt à payer pour pouvoir bénéficier d'un bien ou d'un service. Les méthodes basées sur l'évaluation du consentement à payer peuvent être séparées en deux catégories, celles utilisant un marché artificiel (méthode des dépenses de protection, méthode des prix hédonistes, méthode des coûts de déplacement) et celles utilisant un marché connecté à ce bien ou service non marchand dit « marché de substitution » (méthode d'évaluation contingente).

Méthode d'évaluation des dépenses de protection

La méthode d'évaluation des dépenses de protection consiste à déterminer le montant que les individus consentent à payer pour ne plus subir une atteinte environnementale. Dans le cas d'une pollution sonore par exemple, le dommage sera évalué en chiffrant les dépenses que les individus acceptent de faire en termes de protections contre le bruit (double vitrage...). Cette méthode ne tient donc compte que de ce qui peut être protégé. Dans l'exemple précédent, le fait ne pas pouvoir profiter de son jardin est une nuisance difficile à prendre en compte avec cette méthode.

Méthode des prix hédonistes

La méthode des prix hédonistes repose sur l'idée que la valeur d'un bien n'est pas uniquement liée à ses caractéristiques intrinsèques mais aussi à son environnement général. Dès lors, il s'agit d'observer les sommes que les individus sont prêts à consacrer pour obtenir un bien ou un service donné. Ainsi,

⁴¹ En anglais : willingness to pay.

une même maison coûtera vraisemblablement plus cher si elle est située dans une zone silencieuse que si elle est située au bord d'une autoroute (toutes choses égales par ailleurs). La différence entre ces deux habitations sur le marché de l'immobilier permet une évaluation monétaire du service non marchand qu'est le silence.

Méthode des coûts de déplacement

La méthode des coûts de déplacement s'applique généralement à l'évaluation du patrimoine naturel. Il s'agit de déterminer les coûts de transport réellement dépensés par des individus pour accéder à un site donné et bénéficier de ses atouts (beauté du paysage, bien-être...).

Méthode d'évaluation contingente

Dans les trois méthodes précédentes, il s'agissait d'évaluer des sommes d'argent que les individus dépensent effectivement : les dépenses de protection, le surcoût environnemental ou le coût de transport. La méthode d'évaluation contingente consiste, quant à elle, à interroger les individus (dans le cadre d'enquête) plutôt qu'à observer. Des scénarios d'évolution de biens ou services environnementaux (détérioration, disparition) sont définis et soumis à un échantillon de population. Les personnes sondées se voient alors proposer la non intervention ou la mise en place d'actions d'amélioration qu'elles devront financer (impôts, entrée payante...). Les résultats de ces enquêtes permettent de déterminer le consentement des individus à payer pour la préservation d'un bien ou service non marchand.

2.3 Monétisation des coûts d'inconfort

Les biens et services privés, qualifiés de non marchands, ne s'échangent pas sur un marché mais peuvent être pris en compte par les agents économiques privés lors de certaines décisions⁴². Certains de ces biens et services sont considérés lors de la comparaison de différentes solutions d'amélioration du confort d'été et doivent donc être monétisés.

Le premier d'entre eux est immanquablement le confort thermique. Le confort acoustique intérieur est aussi un critère important dans le choix d'une solution de confort d'été et devra être monétisé. Il diffère selon les solutions et notamment entre un bâtiment climatisé (bruit provoqué par le ventilateur de l'unité intérieure) et un bâtiment naturellement ventilé (bruit provenant de l'extérieur du fait de l'ouverture des fenêtres). Enfin, l'esthétique d'intérieur serait un troisième service privé non marchand à prendre en compte car l'installation d'un climatiseur individuel nécessite notamment la mise en place d'une unité intérieure dans la pièce à climatiser et peut donc dégrader la valeur de cette dernière. Cependant, il a été considéré que les appareils actuels s'intégraient bien dans les bâtiments et que l'esthétique ne serait pas étudiée par la suite.

2.3.1 Les conséquences de l'inconfort thermique d'été

L'inconfort thermique est tout d'abord synonyme d'une détérioration du bien-être (conditions de vie et de travail) mais aussi, lorsque les conditions climatiques sont sévères (fortes chaleurs, mauvaise conception du bâtiment), d'une détérioration de la santé (morbidité et mortalité).

2.3.1.1. Déterioration du bien-être et des conditions de travail

Dans les logements résidentiels, l'inconfort d'été provoque une dégradation du bien-être des occupants. Les conséquences sont à la fois physiques (baisse de forme par exemple) et psychologique (agressivité par exemple). Le sommeil, qui a des conséquences importantes sur la santé physique et psychologique des individus, peut notamment être perturbé par des températures trop élevées (voir les travaux de Raymann et *al.* (2008) à propos de l'impact de la température sur la qualité du sommeil).

Dans les lieux de travail, l'inconfort d'été peut s'accompagner d'une fatigue, de somnolence de la part des employés et au final d'une baisse de leur activité et de leurs performances neuromusculaires et cognitives. Plusieurs études (présentées dans la partie 2.3.2) ont mis en évidence l'augmentation du temps de réponse ainsi que celle des erreurs ou omissions lors de l'exposition à des températures élevées.

2.3.1.2. Impact de l'inconfort thermique sur la morbidité

Concernant la morbidité, il est possible de classer les effets causés par l'inconfort d'été en trois catégories principales : les effets locaux, les effets généraux liés à une insuffisance (voire défaillance) du système de thermorégulation et les effets généraux liés à une mise en jeu excessive de ce même système (IUMTR, 1999).

Les effets locaux sont des réactions physiologiques touchant certaines parties du corps humain. A titre d'exemple, une sudation excessive peut avoir des conséquences cutanées (mycoses, papules, dyshidroses...), et une insuffisance veineuse⁴³ peut être à l'origine d'œdèmes.

Les principaux effets généraux liés à une défaillance du système de thermorégulation sont :

- l'état d'épuisement : la température centrale de l'individu s'élève, celui-ci devenant alors somnolent et, dans les cas les plus sévères, sujet à des vertiges, des vomissements ou des crampes musculaires,
- l'insolation : la tête ou le cou de l'individu sont exposés à une chaleur trop importante, ce qui provoque des convulsions et une perte progressive de la conscience,

⁴² Ces derniers les monétisent donc de façon plus ou moins implicite.

⁴³ La vasodilatation est un système de régulation thermique important (voir Partie 2.1.1.1).

- le coup de chaleur : le corps de l'individu ne parvient plus à se refroidir suffisamment, la température corporelle (normalement de 37 °C) ne cesse d'augmenter et atteint plus de 40 °C. Il peut survenir très vite chez les nourrissons et les personnes âgées en période de grosse chaleur. Le coup de chaleur peut être mortel et doit être soigné rapidement pour qu'il ne persiste pas de séquelles neurologiques.

Les principaux effets généraux liés à une mise en jeu excessive de la thermorégulation sont :

- la déshydratation : une sudation excessive peut s'accompagner entre autre d'une baisse de la pression artérielle et de troubles de la conscience,
- les crampes de chaleur : des contractions spasmodiques involontaires des muscles qui s'accompagnent de douleurs plus ou moins violentes et d'une tachycardie.

2.3.1.3. Impact du confort thermique sur la mortalité

Le bilan de la canicule de 2003 est aujourd'hui établi à environ 22 080 morts en Europe (Kovats et *al.*, 2004). Les enquêtes menées après la canicule de 2003 ont permis de fournir des explications sur les causes des décès et sur les caractéristiques des personnes décédées.

Ledrans (2006) a effectué une synthèse des études menées sur la canicule entre 2003 et 2005. Ces études suggèrent d'une part que les personnes peu autonomes (personnes âgées, personnes souffrant d'un handicap physique, ou d'une maladie mentale) ont été les plus vulnérables à la chaleur et d'autre part, que si les niveaux de pollution photochimique (ozone) ont eu un impact non négligeable pendant la vague de chaleur, la surmortalité observée reste liée en très grande partie à l'effet propre de la chaleur.

A titre d'exemple, en France, pour laquelle des résultats sont présentés Figure 2.11, la part de l'ozone est minoritaire dans les villes où la surmortalité a été la plus élevée (Paris, Lyon, Bordeaux et Rouen).

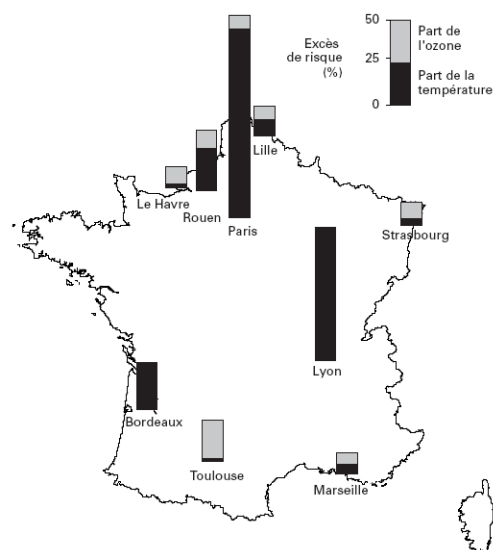


Figure 2.11. Surmortalité (%) liée à l'ozone et à la température, parts relatives de chaque facteur pour la population des 65 ans et plus (période du 3 au 17 août 2003)

Ainsi, en cas de conditions climatiques sévères, de mauvaises conditions de confort thermique dans les logements peuvent s'avérer fatales pour les occupants, notamment lorsque ceux-ci sont faibles et peu autonomes.

2.3.2 Monétisation de l'inconfort dans le secteur tertiaire

Théoriquement, une monétisation de l'inconfort d'été devrait à la fois prendre en compte les impacts sanitaires et la perte de bien-être dans les résidences et les lieux de travail (cette dernière s'accompagnant d'une baisse des performances des employés). Le choix a été fait de se concentrer sur la monétisation du bien-être car celle des impacts sanitaires exigeait une étude à part entière trop importante pour être effectuée lors de cette thèse (évaluation détaillée des impacts sanitaires, des coûts d'intervention des services de santé, des années de vie perdues...).

En ce qui concerne le secteur tertiaire, plusieurs études ont été menées sur le lien entre inconfort et baisse de performance des employés. La méthode de monétisation de l'inconfort d'été que nous avons adoptée pour le secteur tertiaire repose en partie sur l'étude bibliographique de ces travaux. Elle consiste à définir une relation entre productivité et confort thermique, puis à traduire la baisse de productivité en termes monétaires. En cela, elle s'apparente à une méthode de type « monétisation des dommages physiques » (partie 2.2.1).

2.3.2.1. Comment mesurer la productivité ?

La productivité peut être mesurée à partir d'enquêtes de terrain ou d'expériences en laboratoire. Il existe en pratique deux approches principales pour l'évaluation de la productivité : l'approche objective et l'approche subjective.

L'approche objective consiste à évaluer des indicateurs de performance objectifs (temps de réalisation, nombre d'erreurs...) susceptibles d'être pertinents pour le travail de bureau : dactylographie d'un texte, calculs simples (addition, multiplication), temps du traitement d'un appel de consommateur dans un centre d'appel. Il peut apparaître difficile de relier ces résultats aux conditions de travail quotidiennes car cette approche se focalise sur des tâches spécifiques alors qu'une journée de travail est souvent composée de différentes tâches.

L'approche subjective repose sur des auto-évaluations. Pendant le déroulement d'une journée de travail normale, il est demandé aux occupants d'évaluer leur propre productivité sur une échelle de notation subjective (productivité perçue). La force de cette approche est qu'elle n'est pas dépendante de la tâche effectuée et qu'elle est représentative du travail quotidien dans les bureaux. Sa faiblesse réside dans le fait qu'elle n'est pas basée sur des critères objectifs et que la partialité des sujets affaiblit quelque peu la valeur des résultats.

2.3.2.2. Evolution de la productivité en fonction de la température intérieure

La grande majorité des études sur le lien entre productivité et confort thermique restreignent ce dernier à la température intérieure. Les résultats de quelques études sont présentés ci-après et regroupés sur la Figure 2.12. Ils montrent une disparité importante de résultats.

Link et Pepler (1970) ont évalué la productivité dans une usine de vêtements et ont observé une baisse de 8 % de la productivité (pour des tâches de couture) lorsque la température augmentait de 23,9 °C à 32,2 °C.

Niemelä et al. (2001) rapportent une diminution de la productivité des employés de centres d'appel de 1,8 % par °C lorsque la température dépasse 25 °C. Dans une seconde enquête (2002), les auteurs aboutissent à une baisse de 2,2 % par °C lorsque la température dépasse 25 °C.

Federspiel et al. (2002) ont étudié la productivité d'employés de centres d'appel aux Etats-Unis. Si aucune relation significative n'a été trouvée entre température et productivité dans la zone de confort, une baisse de 15 % a été constatée lorsque la température passe de 24,8 °C à 26 °C.

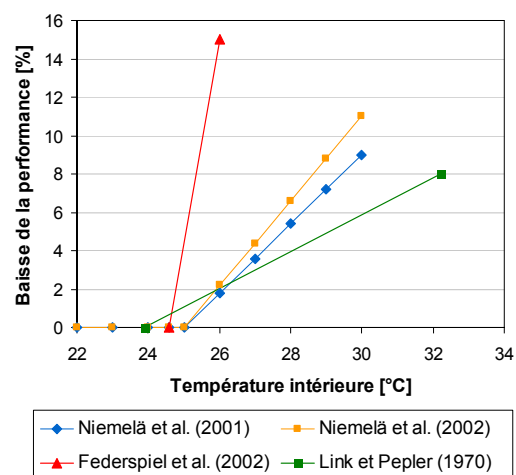


Figure 2.12. Baisse de la productivité en fonction de la température intérieure selon différentes sources

Seppänen et al. (2006) se sont basés sur 24 études existantes⁴⁴ concernant le lien entre productivité au travail et température intérieure en vue de procéder à une méta-analyse. Les études considérées reposent toutes sur des critères d'évaluation objectifs mais les tâches étudiées varient selon les études (travail routinier, tâches mentales...). Parmi toutes ces études, 11 ont été menées sur le terrain (dans des bureaux), 9 dans des laboratoires (chambres climatiques) et 4 dans des écoles.

Le pourcentage d'augmentation de performance par degré d'augmentation de température a été calculé et tracé sur la Figure 2.13, les valeurs positives indiquant une augmentation des performances avec une augmentation des températures. Chacune des pentes calculées (relation performance-température) est associée à une valeur moyenne de température (par exemple, Link et Pepler (1970) ont trouvé une

⁴⁴ Dont : Niemelä et al. (2001, 2002), Federspiel et al. (2002), Link et Pepler (1970) présentées ci-dessus.

réduction de 8 % de la productivité lorsque la température augmentait de 23,9 à 32,2 °C, la pente est donc d'environ 1 % par °C et la température moyenne de 28 °C).

Les études prises en compte sont très différentes en termes de taille d'échantillon (de 9 à 500 personnes) et de méthode. Les résultats des études ont donc été pondérés en fonction de la taille de l'échantillon étudié et de la pertinence de l'étude par rapport aux conditions réelles de travail. Ainsi, les enquêtes réalisées sur sites (i.e. plusieurs tâches, conditions réelles) se voient attribuer plus d'importance que celles ne portant que sur une seule tâche (lecture, dactylographie). Trois courbes de régression ont été tracées sur la Figure 2.13 : sans aucune pondération, avec pondération des résultats en fonction de la taille de l'échantillon considéré, avec pondération des résultats en fonction de la taille de l'échantillon considéré et de la pertinence de l'étude par rapport aux conditions réelles de travail. La Figure 2.13 montre que les performances augmentent avec la température jusqu'à une température de 21-22 °C (ordonnée positive), et que les performances diminuent au dessus de 23-24 °C (ordonnée négative).

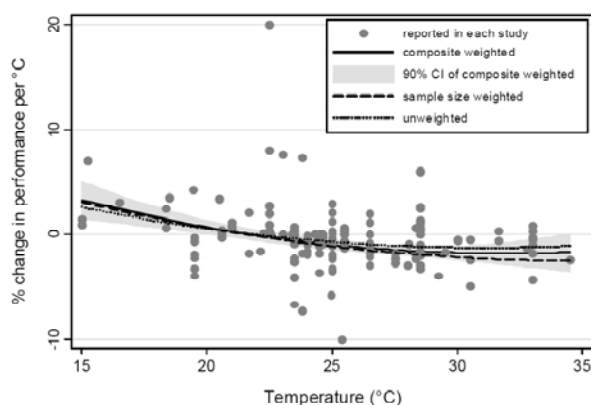


Figure 2.13. Pourcentage d'augmentation de performance par degré d'augmentation de température en fonction de la température intérieure (Seppänen et al., 2006)

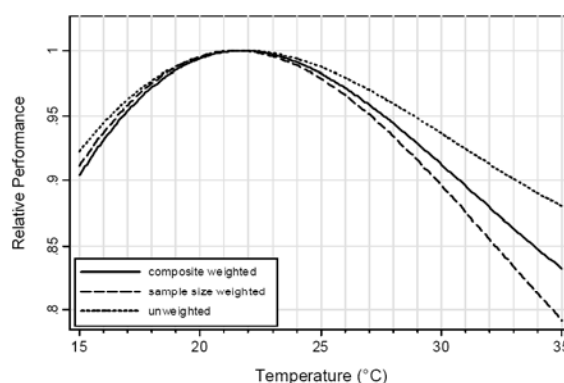


Figure 2.14. Performance normalisée en fonction de la température intérieure (Seppänen et al., 2006)

Les valeurs calculées par régression (Figure 2.13) peuvent être considérées comme les dérivées de la courbe donnant la performance en fonction de la température, ce qui permet à l'auteur de déterminer l'équation de cette dernière. L'équation (2.16) est ainsi obtenue en se basant sur la régression pondérée en fonction de la taille des échantillons et de la pertinence des études par rapport aux conditions réelles de travail (Seppänen et al., 2006). Cette courbe d'évolution des performances en fonction de la température intérieure est tracée sur la Figure 2.14 ainsi que les courbes correspondant aux deux autres pondérations effectuées. Ainsi, à 30 °C, la performance est seulement égale à 91,1 % de la performance à 21,75 °C (qui correspond au maximum de la courbe).

$$P = 0,1647524 \cdot T - 0,0058274 \cdot T^2 + 0,0000623 \cdot T^3 - 0,4685328 \quad (2.16)$$

Avec : P la productivité relative à la valeur maximale (100 % à 21,75 °C) et T la température intérieure de la pièce [°C]

2.3.2.3. Lien entre productivité et sensation thermique

La grande majorité des études sur le lien entre productivité et confort thermique restreignent ce dernier à la température intérieure. McCartney et Humphreys (2002b) étudient quant à eux le lien entre productivité et vote de préférence thermique, censé être plus représentatif du confort thermique de l'occupant (notamment dans les bâtiments non climatisés). Ce travail de recherche repose sur les enquêtes et mesures de terrain effectuées dans le cadre du projet SCATs présenté en partie 2.1.3.2.

La productivité a été évaluée par la méthode dite de la « productivité perçue » : des questionnaires d'évaluation personnels ont été distribués aux occupants et leur productivité est évaluée à l'aide de l'échelle présentée dans le Tableau 2.6.

Tableau 2.6. Question et échelle utilisées pour l'évaluation de la productivité des occupants

Question posée	Echelle de productivité perçue	
At present, how is your productivity being affected by the surrounding environmental conditions?	1	Much higher than normal
	2	Slightly higher than normal
	3	Normal
	4	Slightly lower than normal
	5	Much lower than normal

Les auteurs se sont intéressés à la relation entre température de l'air et productivité perçue. Les résultats sont présentés sur la Figure 2.15 où la productivité perçue est tracée en fonction des quintiles⁴⁵ de température de l'air. Les quantiles varient de 13,1 °C à 31,1 °C : [13,1 °C ; 21,9 °C], [21,9 °C ; 23 °C], [23 °C ; 23,9 °C], [23,9 °C ; 25,2 °C] et [25,2 °C ; 31,1 °C]. Les barres d'erreur correspondent à un intervalle de confiance de 95 %. Ces résultats montrent que la productivité perçue ne varie pas significativement avec la température de l'air.

Les auteurs ont ensuite étudié la relation entre productivité perçue et le vote de préférence thermique (de « plus chaud » (1) à « plus froid » (5) en passant par « pas de changement » (3)). La Figure 2.16 révèle que lorsque l'on s'éloigne de conditions considérées comme confortables par l'occupant, alors la productivité baisse.

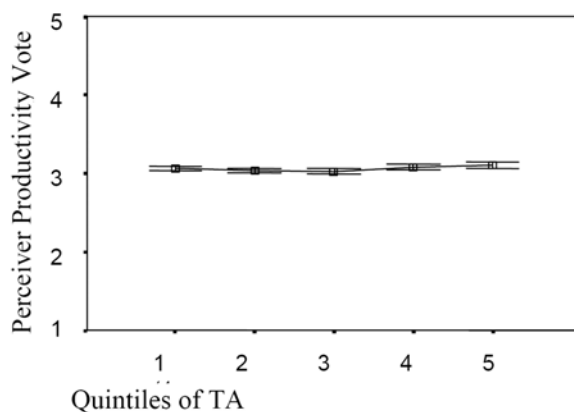


Figure 2.15. Vote de productivité perçue en fonction des quintiles de température de l'air

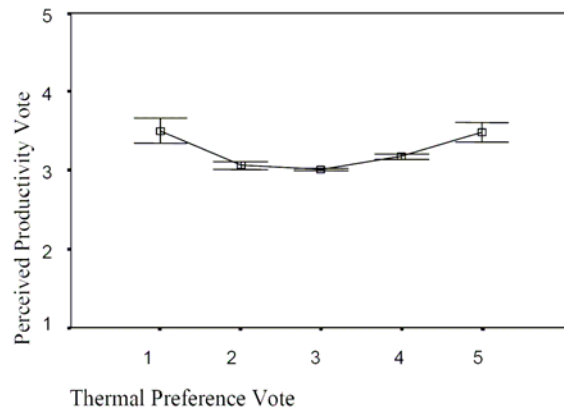


Figure 2.16. Vote de productivité perçue en fonction du vote de préférence thermique

De l'avis même des auteurs, ces résultats sont assez grossiers et devront être améliorés par des recherches futures. L'échelle de perception de la productivité notamment est assez simpliste et sujette à de nombreux biais. Malgré cela, McCartney et Humphreys (2002b) montrent que si la productivité n'est pas véritablement influencée par la température en elle-même, elle l'est manifestement par la perception du confort thermique. Ainsi, les occupants peuvent ne pas ressentir de baisse de productivité à des températures faibles ou élevées à condition qu'ils aient les moyens d'adaptation suffisants pour maintenir un niveau de confort acceptable.

2.3.2.4. Intervalle de température sans effet sur la productivité

Plusieurs études ont confirmé l'idée qu'il existait un intervalle de température sans effet significatif sur la productivité. Federspiel et al. (2002) ont par exemple constaté qu'entre 21,5 °C et 24,75 °C, les variations de température n'affectent pas la vitesse de travail, cette dernière au contraire étant fortement réduite à partir de 26 °C. On retrouve cet intervalle sans effet significatif sur la productivité

⁴⁵ Le quintile est une portion de la distribution de fréquence contenant un cinquième du total de l'échantillon.

dans l'étude de Witterseh (2001) qui n'a pas trouvé de différence entre les performances de sujets thermiquement neutres ou ayant légèrement chaud à 22 °C et à 25 °C (simulation d'un travail de bureau (multiplication, dactylographie, additions) dans des chambres climatiques).

De même, la méta-analyse de Seppänen et *al.* (2006) abouti à une équation admettant un optimum, mais celui-ci doit être considéré avec attention. En effet, si la Figure 2.13 illustre le fait que les performances augmentent avec la température jusqu'à une température de 21-22 °C, et que les performances diminuent au dessus de 23-24 °C, la surface grisée, qui représente l'intervalle de confiance de 90 %, doit aussi être considérée. Cet intervalle de confiance est positif jusqu'à 20 °C et négatif au dessus de 24 °C, ce qui signifie qu'une augmentation de la température jusqu'à 21 °C est associée à une amélioration statistiquement significative des performances et qu'une augmentation de la température au delà de 24 °C est associée à une diminution statistiquement significative des performances. Selon Seppänen et *al.* (2006), ceci corrobore l'idée qu'il existe un intervalle de température sans véritable conséquence sur la productivité.

Enfin, il a été montré précédemment (Figure 2.16) que la productivité baissait lorsque l'on s'éloignait de conditions considérées comme confortables par l'occupant, mais que les conditions climatiques intérieures n'avaient aucune incidence directe significative sur la productivité à partir du moment où les occupants étaient en situation de confort thermique.

2.3.2.5. Monétisation considérée pour la suite du travail

Relation productivité-confort thermique

Quatre idées générales ressortent de l'étude bibliographique que nous avons menée sur la relation productivité-confort thermique :

- l'inconfort thermique peut entraîner une baisse de productivité des occupants,
- les résultats obtenus concernant l'amplitude de cette baisse de productivité sont disparates,
- il existe un intervalle de température sans effet significatif sur la productivité,
- la productivité est liée plus généralement à la sensation de confort et non uniquement à la température.

Pour ce travail, nous considérerons qu'il n'y a pas de pertes de productivité à partir du moment où les occupants sont en situation de confort thermique. Les zones de confort retenues pour les bâtiments climatisés et non climatisés ont été présentées dans la partie 2.1.4. Lorsque les conditions climatiques s'éloignent de la zone de confort, l'hypothèse d'une diminution de la productivité de 2 % par augmentation de 1 °C est retenue. Cette pente est représentative des différentes études présentées ci-dessus (et notamment des travaux de Niemelä et *al.* (2001, 2002)).

La Figure 2.17 représente l'hypothèse retenue pour une température opérative maximale autorisée de 26 °C (valeur recommandée par défaut pour les bâtiments climatisés selon la norme EN 15251) ainsi que la relation entre baisse de performance et température sur laquelle aboutit la méta-analyse menée par Seppänen et *al.* (2006).

La productivité est ainsi calculée à partir de l'équation (2.17).

$$P = \begin{cases} -2 \cdot T + (100 + 2 \cdot T_{conf}) & \text{si } T > T_{conf} \\ 100 & \text{si } T \leq T_{conf} \end{cases} \quad (2.17)$$

Avec : P la productivité [%], T la température opérative [°C] et T_{conf} la température maximale autorisée [°C] selon la zone de confort retenue (partie 2.1.4).

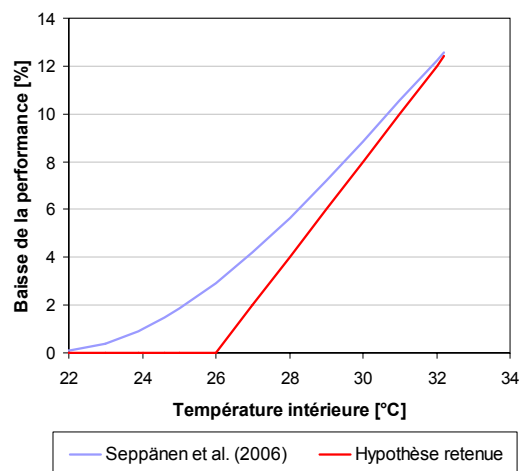


Figure 2.17. Hypothèse retenue pour une température maximale autorisée de 26 °C

Traduction de la baisse de productivité en termes monétaires

Des simulations de bâtiments permettront d'obtenir le profil des conditions climatiques intérieures à chaque pas de temps pendant une année et donc de calculer le nombre de degrés-heures (heures de travail) d'inconfort. Avec l'hypothèse retenue concernant la baisse de productivité des occupants, il est considéré que 2 % de ces degrés-heures correspondent à des heures de travail perdues à cause de l'inconfort thermique. En multipliant ce chiffre par le coût horaire du travail, il devient possible d'estimer les pertes économiques par rapport à une situation où les conditions climatiques intérieures du bâtiment resteraient dans la zone de confort. Le coût de l'inconfort par degré-heure et par employé peut donc s'écrire sous la forme de l'équation (2.18).

$$C_I = 0,02 \cdot (T - T_{conf}) \cdot C_T \quad \text{si } T > T_{conf} \quad (2.18)$$

Avec : C_I la perte économique due à l'inconfort par employé et par degré heure d'inconfort, C_T le coût horaire du travail [€], T la température opérative [°C] et T_{conf} la température maximale autorisée [°C] selon la zone de confort retenue (partie 2.1.4).

Le coût du travail est le coût total payé par les employeurs pour rémunérer le facteur de production travail. Il comprend le salaire brut (avec les primes, les congés payés et les cotisations sociales à la charge des salariés) et les cotisations sociales patronales. Ce coût dépend donc de nombreux facteurs tels que l'employé (niveau de qualification, ancienneté...), l'entreprise (politique des salaires...) ou le pays (niveau des charges...). Concernant la France, l'Office statistique des communautés européennes révèle que le coût horaire moyen de la main d'œuvre était de 29,3 € en 2005 (EC, 2008), valeur que nous retiendrons par la suite comme coût horaire du travail lors de l'utilisation de l'équation (2.18).

Le coût d'inconfort est alors de 60 €cts par degré-heure d'inconfort et par occupant.

2.3.2.6. Limites de la monétisation

Les conclusions sur le lien entre confort thermique et productivité varient grandement d'une étude à l'autre, et ce pour de nombreuses raisons : tâches et exercices étudiés, conditions (réelles ou en chambres), etc. De plus, en conditions réelles, la productivité dépend aussi des occupants (stress, fatigue), des pratiques de gestion du personnel, du type de travail effectué, des caractéristiques du bâtiment autres que le confort thermique (nuisances sonores, qualité de l'air), etc. L'influence du confort thermique peut donc s'avérer de second ordre dans certains cas. Si le lien entre productivité et confort thermique ne peut être ignoré, la monétisation de l'inconfort thermique est donc empreinte d'un niveau d'incertitude élevé.

2.3.3 Monétisation de l'inconfort thermique dans le secteur résidentiel

Théoriquement, une monétisation de l'inconfort d'été devrait à la fois prendre en compte les impacts sanitaires et la perte de bien-être dans les résidences et les lieux de travail. Le choix a été fait de se concentrer sur la monétisation du bien-être car celle des impacts sanitaires exigeait une étude à part entière trop importante pour être effectuée lors de cette thèse (évaluation détaillée des impacts sanitaires, des coûts d'intervention des services de santé, des années de vie perdues...).

2.3.3.1. Méthode adoptée

Concernant le résidentiel, il n'existe pas, à notre connaissance, de travaux sur la monétisation de l'inconfort thermique. Une méthode d'évaluation des dépenses de protection (basée sur la détermination du consentement à payer) est appropriée pour la monétisation du bien-être. Cette méthode consiste à déterminer le montant que les individus consentent à payer pour ne plus subir une atteinte environnementale. Il s'agit donc ici d'évaluer des solutions d'amélioration du confort d'été en termes de réduction de l'inconfort et de coûts pour les occupants.

2.3.3.2. Détermination du coût d'inconfort thermique dans le résidentiel

Dans une communication (Grignon-Massé et *al.*, 2007), nous avons développé une méthodologie afin de comparer l'amélioration du confort et la consommation d'électricité engendrée par un climatiseur et un ventilateur sur pied dans un contexte résidentiel. Cette communication est retranscrite en Annexe 1 de ce manuscrit.

Le climatiseur permet d'obtenir un confort total et la quantité d'énergie qu'il consomme est obtenue par simulation dynamique d'une pièce de référence à l'aide du logiciel CONSOCLIM.

L'évaluation des performances du ventilateur nécessite le développement d'un algorithme modélisant le comportement de l'occupant. L'approche développée dans cette communication est basée sur les indices de Fanger (partie 2.1.2) car ils permettent de prendre en compte l'amélioration du confort engendré par l'augmentation des vitesses d'air. Il est supposé que l'occupant peut réduire son inconfort en ajustant sa vêtue dans un premier temps puis en allumant le ventilateur. Des simulations sont effectuées en évolutions libres afin d'obtenir les conditions climatiques intérieures. Ensuite, comme le présente le schéma de la Figure 2.18, le PPD⁴⁶ est optimisé à chaque pas de temps en fonction de la vêtue puis de la vitesse d'air. Ceci permet de calculer les heures de fonctionnement du ventilateur et les heures d'inconfort. Les heures de fonctionnement du ventilateur correspondent aux heures considérées comme inconfortables lorsque la vêtue est le seul levier d'adaptation (PPD supérieur à 10 %), mais pour lesquelles l'augmentation des vitesses d'air permet de diminuer le PPD, et donc de réduire l'inconfort. Les heures d'inconfort sont les heures pour lesquelles il n'est pas possible d'obtenir un indice PPD inférieur à 10 % même en jouant sur la vêtue et les vitesses d'air.

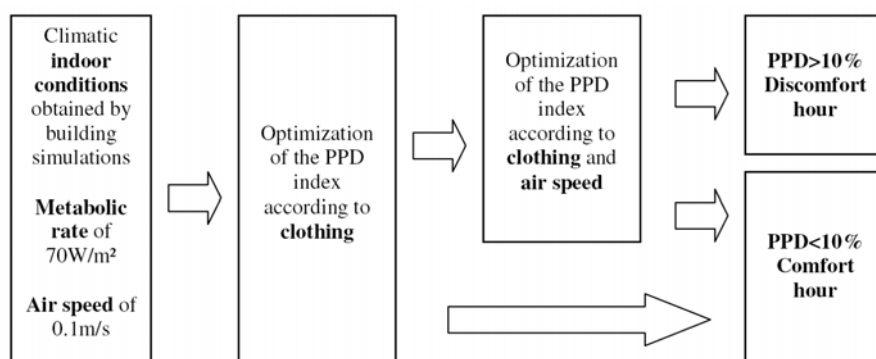


Figure 2.18. Approche adoptée pour calculer les heures d'inconfort et le nombre d'heures de fonctionnement du ventilateur

Cette approche a été appliquée à un bâtiment résidentiel simulé pour trois climats français : Trappes, Pau et Rennes. La Figure 2.19 présente par exemple le nombre d'heures d'inconfort estival (mai-septembre) obtenue avec et sans ventilateur. L'utilisation d'un ventilateur permet de diminuer d'environ 70 % le nombre d'heures d'inconfort. Ce nombre d'heure peut être réduit à néant en employant un climatiseur.

Les différentes hypothèses nécessaires aux calculs (description des systèmes, des bâtiments) et des résultats plus détaillés peuvent être trouvés dans la communication présentée en Annexe 1.

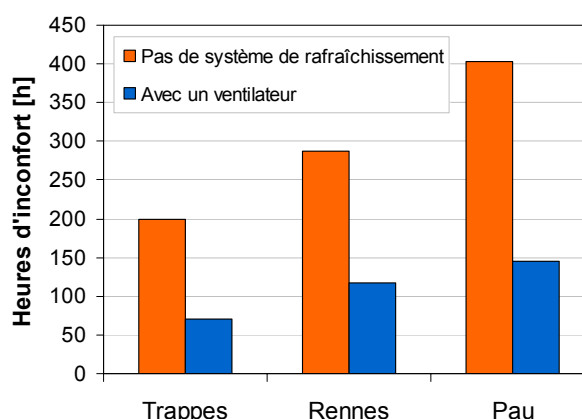


Figure 2.19. Nombre d'heures d'inconfort obtenue avec et sans ventilateurs

⁴⁶ L'indice PPD est le pourcentage prévisible d'insatisfaits (Partie 2.1.2.1). L'optimiser consiste à le minimiser.

Si une première tentative d'évaluation monétaire de l'inconfort avait été proposée dans la communication, la réalisation, depuis lors, d'études sur les climatiseurs individuels (Rivière et *al.*, 2009) et les ventilateurs de confort (Adnot et *al.*, 2009) permet de préciser nos hypothèses.

Il est supposé que l'occupant a le choix entre un ventilateur de type « Single Duct » et un ventilateur sur pied qui peuvent être considérés tous les deux comme des systèmes de rafraîchissement individuels. Les caractéristiques présentées dans le Tableau 2.7 sont celles d'appareils moyens sur le marché européen selon Adnot et *al.* (2009) et Rivière et *al.* (2009).

Tableau 2.7. Caractéristiques des systèmes de rafraîchissement retenus

	Consommation électrique par heure de fonctionnement	Coût d'achat TTC
Ventilateur sur pied	50 W	70,5 €
Climatiseur Single Duct	956,5 W ⁴⁷	389,4 €

Les consommations et les degrés-heures d'inconfort⁴⁸ associés sont présentés Figure 2.20 pour les trois villes étudiées et pour trois configurations :

- pas de système de rafraîchissement,
- utilisation du ventilateur,
- utilisation du climatiseur.

Il est supposé que le ventilateur n'est plus utilisé une fois le climatiseur acheté.

Il apparaît que le ventilateur permet de réduire significativement les degrés-heure d'inconfort (de l'ordre de 70 %) pour une consommation électrique représentant environ 5 % de celle du climatiseur.

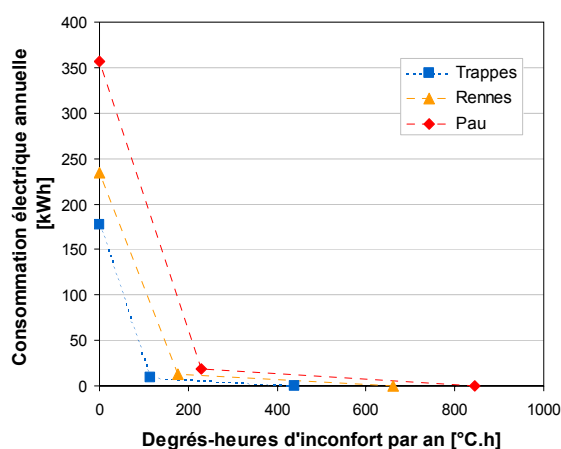


Figure 2.20. Consommation électrique et inconfort pour les trois configurations étudiées

Les dépenses à effectuer par l'occupant pour réduire son inconfort sont calculées en coût global sur une période de 8 ans en supposant un taux d'actualisation de 6 %, une durée de vie des deux appareils de 8 ans, et un prix de l'électricité de 14,5 €cts TTC par kWh (avec augmentation de 1,5 % par an)⁴⁹.

Ces dépenses sont présentées sur la Figure 2.21 et sont exprimées par degrés-heure d'inconfort évités afin de permettre une comparaison avec la monétisation retenue pour le secteur tertiaire. Selon ces résultats, il est possible de réduire significativement l'inconfort (environ 70 % des degrés-heure) à un coût de l'ordre de 2 €cts par degré-heure évité. La suppression complète de l'inconfort requiert l'achat d'un climatiseur et une dépense plus lourde, de l'ordre de 40 à 65 €cts par degré-heure évité. Les résultats de cette étude montrent donc que les individus qui achètent des climatiseurs sont prêts à payer de l'ordre de 50 €cts par degré-heure d'inconfort évité.

⁴⁷ Un fonctionnement à pleine charge est supposé pour chaque heure de fonctionnement (puissance frigorifique de 2,2 kW et EER de 2,3).

⁴⁸ La zone de confort est l'ensemble des conditions climatiques permettant d'obtenir un PPD inférieur à 10 %.

⁴⁹ Hypothèse retenue par Rivière et *al.* (2009) comme prix moyen de l'électricité en Europe.

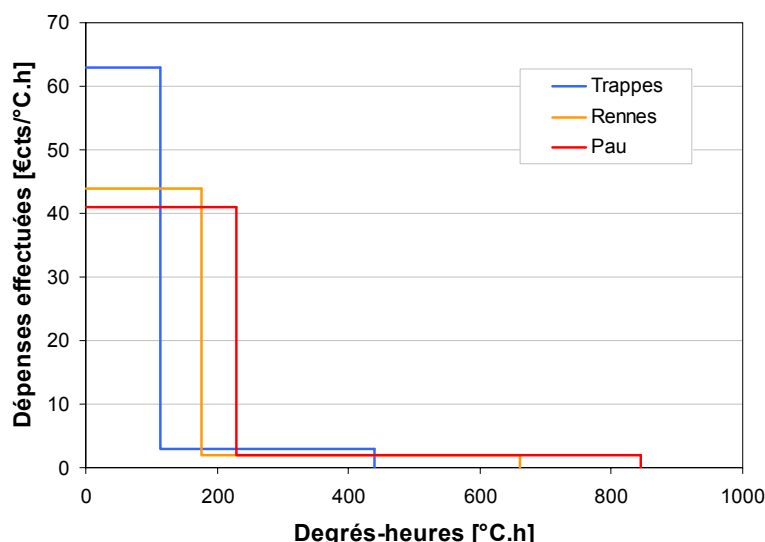


Figure 2.21. Dépenses effectuées par l'occupant pour réduire son inconfort

2.3.3.3. Monétisation retenue

La monétisation des coûts d'inconfort est empreinte d'incertitudes importantes. Les résultats auraient été différents si d'autres systèmes, d'autres bâtiments, d'autres hypothèses économiques avaient été considérés. Idéalement, il conviendrait de réaliser des enquêtes pour savoir à partir de quel inconfort les occupants sont prêts à investir dans une solution d'amélioration du confort d'été et dans quelle mesure.

Malgré des limites importantes, cette étude nous aura permis de vérifier que le coût d'inconfort défini pour le tertiaire (60 €cts par degré-heure d'inconfort et par occupant) était du même ordre de grandeur que pour le secteur résidentiel. Dans la suite de l'étude ce coût d'inconfort est utilisé pour ces deux secteurs.

2.3.4 Etude du confort acoustique

2.3.4.1. L'inconfort acoustique : conséquences et méthodes de monétisation

L'intensité d'un bruit est caractérisée par son niveau de pression acoustique exprimé en décibel (dB). L'oreille humaine n'ayant pas la même sensibilité au bruit sur toutes les fréquences (très sensible dans les mediums, elle perçoit moins bien les graves et les aigus), une unité dérivée, le dB(A), est utilisée pour tenir compte de la manière dont l'oreille perçoit de façon différenciée ces fréquences. L'échelle des dB(A) va du seuil d'audibilité (0 dB(A)) au seuil de douleur (130 dB(A)).

Les conséquences de la pollution sonore sont nombreuses : hypertension, troubles du sommeil, perturbation de la communication orale...

De nombreux travaux ont été effectués sur la monétisation de la pollution sonore et celle-ci est aujourd'hui prise en compte, sous certaines conditions, dans l'évaluation de projets d'infrastructures de transport (Boiteux, 2001). Selon les auteurs d'ExternE⁵⁰ (CE, 2005a), si des méthodes d'évaluation contingente ont quelques fois été utilisées, ce sont surtout les méthodes d'évaluation des dépenses de protection et des prix hédonistes qui ont été appliquées pour monétiser les nuisances sonores.

⁵⁰ Le projet ExternE est présenté ci-après en partie 2.4.1.2.

2.3.4.2. Monétisation retenue pour l'inconfort acoustique

Dans cette étude, il existe deux sources de nuisances sonores pour l'occupant : l'unité intérieure du climatiseur et l'environnement extérieur lorsque les fenêtres sont ouvertes dans un bâtiment naturellement ventilé.

En ce qui concerne les nuisances sonores provenant de l'extérieur, le Tableau 2.8 présente des exemples d'intensités pouvant être atteintes (d'après Mouret et Vallet (1995)).

Tableau 2.8. Exemples d'intensités sonores (d'après Mouret et Vallet (1995))

Bruits extérieurs	dB(A)	Sensation auditive	Possibilité de conversation
Bruits minimaux le jour dans la rue	45	Assez calme	A voix normale
Rue très tranquille	50	Bruits courants	Assez forte
Rue résidentielle	60		
Circulation importante	70	Bruyant mais supportable	Difficile
Circulation intense	85	Pénible à entendre	
Rue à trafic intense	95		
Marteau piqueur	100	Très difficilement supportable	Obligation de crier

De nombreux travaux de monétisation ont été menés sur les nuisances sonores liées aux transports. De façon générale, les modèles de monétisation sont souvent construits sur la même forme : un coût nul entre 0 dB(A) et une valeur seuil en dB(A), puis une progression linéaire du coût en fonction de l'intensité en dB(A). A la demande de la Commission européenne, le groupe de travail «Santé et aspects socio-économiques du bruit» s'est penché sur la question de la monétisation du bruit (Navrud, 2002) et a proposé pour le bruit routier : 25 €/dB(A)/ménage/an (à partir de 55 dB(A)⁵¹), valeur qui pourra être utilisée par défaut par les pays ne disposant pas de valeurs nationales lors de l'évaluation des bénéfices des plans d'actions de lutte contre le bruit (Lambert, 2008).

Cette valeur est retenue pour cette étude. Elle correspond à 10,4 €/dB(A)/personne/an en considérant qu'un ménage est constitué de 2,4 personnes (moyenne pour l'Europe des 25 d'après (CE, 2008)), ce qui permet d'aboutir aux coûts présentés dans le Tableau 2.9 pour différents niveaux de pollutions sonores. Il sera étudié au chapitre 5 dans quelle mesure la prise en compte des nuisances sonores peut influencer sur les comparaisons de solutions d'amélioration du confort d'été.

Tableau 2.9. Coûts des nuisances sonores retenus pour cette étude

Bruits extérieurs	dB(A)	Coûts [€/personne/an]
Bruits minimaux le jour dans la rue	45	0
Rue très tranquille	50	0
Rue résidentielle	60	52
Circulation importante	70	156
Circulation intense	85	312
Rue à trafic intense	95	416

⁵¹ L'unité utilisée pour quantifier le bruit est le niveau acoustique équivalent L_{eq} qui correspond à une intensité acoustique moyenne sur une période de temps donnée (ici sur l'année).

2.4 Monétisation des externalités liées au confort d'été

2.4.1 Détermination des externalités à prendre en compte dans cette étude

2.4.1.1. Définition générale des externalités

En économie, une imperfection (ou défaillance) de marché désigne une situation dans laquelle le marché seul ne parvient pas à allouer les ressources de façon optimale. Sans rentrer dans le détail du débat sur ces imperfections⁵², il est souvent fait appel au critère de Pareto qui statue qu'un équilibre est optimal lorsqu'on ne peut augmenter le bien-être d'un individu qu'en diminuant celui des autres (l'optimum est « le plus grand bien-être possible aux individus de la collectivité »).

Selon Giraud (2004), il existe trois types d'imperfections de marché microéconomiques : les biens publics, les monopoles naturels et les externalités. Un bien public est un bien ou un service dont tout le monde peut bénéficier une fois qu'il est produit (non excludabilité) et dont la consommation par un individu n'empêche pas la consommation par un autre (non rivalité). Il existe un monopole naturel lorsque, sur un marché donné, la courbe de demande des consommateurs et les techniques conduisent à ce que la production au moindre coût s'obtienne avec une seule entreprise et non avec plusieurs entreprises en concurrence⁵³.

Enfin, on définit le terme d'externalité négative (ou positive) lorsqu'un acteur économique fait supporter un coût (ou apporte un bénéfice) à un autre acteur sans qu'il existe un marché de droits de propriété tel que l'acteur lésé (ou favorisé) puisse se faire payer (ou doive payer) par celui qui le lèse (ou celui qui l'avantage) (Giraud, 2004).

Un exemple célèbre d'externalité est celui développé par Meade (1952) concernant un apiculteur et un arboriculteur. Dans cet exemple, la présence de l'arboriculteur permet à l'apiculteur d'obtenir un miel de meilleure qualité, miel qu'il pourra vendre à meilleur prix. Celui-ci profite donc gratuitement de la proximité de l'arboriculteur : il s'agit d'une externalité positive. D'autre part, l'arboriculteur profite lui aussi gratuitement de la présence de l'élevage d'abeilles à proximité de ses cultures : la pollinisation de ses arbres s'en trouve améliorée (amélioration du rendement), la pollinisation aléatoire des abeilles enrichit la diversité génétique permettant aux plantations de devenir plus résistantes aux maladies. Il s'agit de nouveau d'une externalité positive⁵⁴.

Les externalités sont nombreuses et disparates, on distingue habituellement deux grands types d'externalité :

- Les externalités technologiques : l'action d'un agent économique affecte le bien-être d'un autre sans altérer les prix (la perte de la biodiversité par exemple).
- Les externalités pécuniaires : l'action d'un agent économique affecte le bien-être d'un autre à travers des modifications des coûts (la construction d'une autoroute par exemple et la perte d'aménité qui l'accompagne entraîne une baisse de la valeur des propriétés environnantes).

2.4.1.2. Externalités à étudier en matière d'énergie

Pour un problème donné, il existe de très nombreuses externalités, ne serait-ce qu'environnementales (biodiversité, aménités, pollution thermique, pollution atmosphérique...). En règle générale, il est donc nécessaire de se focaliser uniquement sur certaines des externalités existantes. C'est pourquoi les coûts externes sont généralement sous-estimés.

⁵² Peut-on juger de l'optimalité d'une allocation de façon absolue ? Peut-on échapper à la subjectivité et à l'arbitraire en définissant l'optimalité ?

⁵³ Une seule entreprise est souvent capable de distribuer l'électricité à toute une ville à un coût moindre que deux entreprises se partageant le marché : les coûts moyens décroissent avec le nombre d'abonnés raccordés au réseau.

⁵⁴ D'ailleurs, l'apport des insectes pollinisateurs aux principales cultures mondiales a été monétisé et évalué à 153 milliards d'Euros en 2005 (Galus, 2008).

Le projet ExternE est la référence européenne en ce qui concerne l'étude des externalités. Ce projet, financé par la Commission Européenne, a été engagé en 1990 avec pour objectif initial d'élaborer une méthodologie d'intégration des externalités. Depuis, les résultats de ce projet sont régulièrement revus et approfondis, la dernière révision des résultats ayant eu lieu en 2005 (CE, 2005a). Cette méthodologie a notamment été appliquée pour comparer les différentes filières de production d'électricité et les différents modes de transports (CE, 2003), mais elle a aussi contribué à l'élaboration de politiques environnementales en Europe (Holland, 2001).

Si l'objectif du projet était de couvrir tous les coûts externes pertinents (i.e. non négligeables), en l'état actuel des connaissances il existe toujours des lacunes importantes sur l'évaluation de certains. Les catégories d'impacts suivantes étaient abordées dans la dernière version de la méthodologie et leur pertinence, dans notre contexte, sera analysée par la suite :

- impacts environnementaux : les impacts environnementaux signifient ici les impacts causés par la libération de substances (particules fines...) ou d'énergie (bruit, rayonnement, chaleur) dans l'environnement (air, terre, eau),
- impacts dus au changement climatique,
- les accidents liés à la production et au transport d'énergie,
- la sécurité énergétique.

Il est aussi mentionné que les impacts sur l'emploi et l'épuisement des ressources non renouvelables ne sont pas traités car ils ne sont pas considérés comme des externalités (CE, 2005a). Ce dernier point ne faisant pas consensus, il sera abordé ultérieurement.

Enfin, l'installation massive de climatiseurs pouvant générer un besoin d'investissement dans de nouvelles capacités de production et de transport d'électricité, il semble important d'étudier les coûts externes liés aux conséquences sur le réseau.

Trois types d'externalités environnementales sont donc étudiés en partie 2.4.2 : les impacts environnementaux, les impacts liés au changement climatique et l'épuisement des ressources non renouvelables, ainsi que quatre types d'externalités non environnementales en partie 2.4.5 : les accidents, la sécurité énergétique, les impacts sur l'emploi et sur le réseau électrique.

2.4.2 Monétisation des externalités environnementales (hors effet de serre)

Les impacts environnementaux signifient ici les impacts causés par la libération de substances (particules fines...) ou d'énergie (bruit, rayonnement, chaleur) dans l'environnement (air, terre, eau). Celles-ci sont transportées (quelques fois transformées) avant d'atteindre finalement des récepteurs (humains, faune, matériaux...) où elles peuvent présenter un danger et causer des dégâts.

Les causes d'externalités environnementales sont donc nombreuses et disparates (pollutions : sonores, atmosphériques, chimiques, thermiques...). Dans cette thèse, l'étude des externalités environnementales repose sur les résultats du projet ExternE (CE, 2005a) qui se focalise sur les pollutions atmosphériques (pouvant ensuite impacter l'eau ou les sols) et les pollutions sonores.

2.4.2.1. Présentation de la méthodologie d'Analyse des Voies d'Impact

Méthodologie : comment quantifier les impacts environnementaux ?

L'évaluation des externalités environnementales repose généralement sur une méthode de monétisation des dommages physiques, dite d'analyse des voies d'impact (AVI), qui retrace le passage du polluant depuis son émission jusqu'aux récepteurs affectés (population, cultures, forêts, bâtiments...). Les étapes principales de cette analyse sont les suivantes :

- Evaluation des émissions : spécification des technologies et polluants concernés (par exemple le nombre de kilogrammes de NO_x émis par GWh produit par une centrale électrique).
- Etude de la dispersion : calcul de l'augmentation de la concentration en polluants dans l'environnement (air, eau et sols) de toutes les régions affectées (par exemple la concentration

accrue d'ozone, en utilisant des modèles de dispersion atmosphérique et de la chimie de formation d'ozone due aux NO_x).

Les auteurs d'ExternE utilisent une combinaison de modèles de dispersion locale (distance par rapport à la source inférieure à 50 km) et de dispersion régionale pour tenir compte de tous les dommages significatifs. Ils tiennent compte des réactions chimiques de transformation de polluants primaires en polluants secondaires (par exemple la formation de sulfates à partir de SO₂). Il est à noter que lorsque les polluants sont émis dans l'air, la dose ingérée peut être de deux ordres de grandeur plus importante que la dose par inhalation.

- **Evaluation des impacts** : calcul de la concentration ou de la dose absorbée par les récepteurs et calcul des impacts (en unités physiques) de cette dose, en utilisant une fonction dose-réponse. Ce type de fonction rapporte la quantité de polluant (ozone par exemple) qui affecte un récepteur (la population par exemple) à l'impact physique sur ce récepteur (nombre de cas d'asthme provoqués par l'augmentation de la concentration d'ozone). De telles fonctions sont disponibles pour les impacts sur la santé humaine, les matériaux, les cultures...
- **Monétisation des impacts** : évaluation monétaire des impacts, par exemple en multipliant le nombre de cas d'asthme par son coût sociétal. Les coûts comprennent des valeurs marchandes (dépenses de santé) et non marchandes (perte d'aménités liées au bruit).

Les impacts (sur tous les récepteurs potentiellement affectés par un polluant) sont ensuite agrégés. Le calcul des externalités selon la méthode AVI s'effectue à partir d'un site géographique et de technologies données. Les résultats obtenus dépendent des caractéristiques du site (densité de population, vents dominants, hauteur de la cheminée...) et peuvent varier significativement pour un même polluant. La méthode AVI est une analyse pluridisciplinaire nécessitant des connaissances en ingénierie, en modèles de dispersion, en épidémiologie, en écologie et en économie.

Catégories d'impacts prises en compte

Les catégories d'impacts environnementaux prises en compte dans le projet ExternE sont présentées dans le Tableau 2.10 ainsi qu'un aperçu des principaux effets monétisés.

Tableau 2.10. Catégories d'impact considérées dans ExternE (CE, 2005) et principaux effets monétisés

Catégories d'impact	Principaux polluants	Principaux effets
Santé - Mortalité	PM ₁₀ , SO ₂ , NO _x , O ₃	Réduction de la durée de vie
	Benzène, particules diesel	Cancers
Santé - Morbidité	PM ₁₀ , SO ₂ , O ₃	Hospitalisations pour problèmes respiratoires
	PM ₁₀ , O ₃	Réduction du nombre de jours travaillés
	PM ₁₀ , CO	Insuffisance cardiaque
	Benzène, particules diesel	Risque de cancer (non fatal)
	PM ₁₀	Hospitalisations pour problèmes cérébraux-vasculaire
		Cas de bronchites chroniques
		Cas de toux chroniques
		Symptômes respiratoires
	O ₃	Attaque d'asthme
	Bruit	Hypertension
		Angine de poitrine
Matériaux de construction	SO ₂ , dépôts acides	Vieillessement de l'acier, du calcaire, peintures...
	Particules (combustion)	Salissure des bâtiments
Cultures	SO ₂ , NO _x , O ₃	Modification des rendements (blé, pommes de terre, orge...)
	Dépôts acides	Augmentation du besoin de chaulage des sols
Perte d'aménité	Bruit	Perte d'aménité due à des nuisances sonores
Ecosystèmes	Dépôts acides, dépôts d'azote	Acidification et eutrophisation

2.4.2.2. Monétisation des externalités environnementales liées aux émissions de polluants

Utilisation des résultats issus de l'AVI

Les émissions de polluants peuvent être d'origines très différentes : chauffage individuel, centrale électrique... Théoriquement, il faudrait effectuer, pour chaque cas, une AVI spécifique au site et à l'équipement concerné. En pratique, les émissions sont généralement sommées puis multipliées par des indices d'impact (€ par quantité de polluant) ne prenant pas en compte les conditions locales (ce qui n'est théoriquement justifié que pour les polluants à longue durée de vie). Ce travail de thèse ne portant sur aucun cas particulier, l'utilisation d'indices d'impact représentatifs est inévitable.

Détermination des indices d'impacts

Le Tableau 2.11 (Rabl et Spadaro, 2005) regroupe les indices d'impact pour les principaux polluants émis par les systèmes énergétiques (centrales électriques, chaudières) en Europe. Ces valeurs seront utilisées par la suite.

Pour le cas particulier de la production d'électricité d'origine nucléaire, les coûts externes peuvent prêter à débat. Tout d'abord, il n'existe pas de consensus méthodologique sur la prise en compte du risque, même faible, d'accident nucléaire (voir partie 2.4.4.1). Ensuite, les coûts et les risques associés à la gestion et au stockage des déchets radioactifs à durée longue, quand ils sont pris en compte, sont écrasés par l'actualisation. Enfin, le risque de prolifération nucléaire est une externalité qui n'est pas monétisée.

Tableau 2.11. Indices d'impact pour différents polluants émis en Europe (Rabl et Spadaro, 2005)

Polluants	Indices d'impact [€/tonne]
SO ₂ (primaire et secondaire via sulfates)	2939
NO _x (primaire et secondaire via nitrates)	2908
PM _{2,5}	19 539
Arsenic	80 000
Cadmium	39 000
Chrome	31 500
Plomb	1 600 000
Nickel	3 800
Formaldéhyde	120
Composés Organiques Volatiles	1 124

Aucun indice d'impact n'a été trouvé concernant ce type de pollution, les coûts externes sont directement donnés par kilowattheure électrique produit. Pour la suite, la valeur de 0,19 €/kWh produit est retenue (CE, 2005). Elle est basée sur la technologie actuelle de la France et est constituée pour une très grande part du risque de cancers pour les générations futures. Cette estimation du cycle nucléaire suppose un fonctionnement normal dans un système politique stable, avec un contrôle strict de la conformité à tous les règlements.

2.4.2.3. Monétisation des externalités environnementales liées à l'épuisement des ressources non renouvelables

L'épuisement important des ressources non renouvelables (pétrole, matières premières...) aura un impact significatif sur le niveau de vie des générations futures. Les systèmes économiques devront se reposer sur une consommation de plus en plus faible de ces ressources, ce qui nécessitera une transition avec le développement de nouvelles technologies, une utilisation à plus large échelle de ressources renouvelables, etc. Les coûts liés à la transformation du système économique devraient donc être considérés comme des externalités négatives pour les générations à venir.

Toutefois, selon certains économistes (Solow⁵⁵ par exemple), le progrès donne souvent les moyens de dépasser le caractère limité des ressources non renouvelables (efficacité énergétique, amélioration du taux de récupération du pétrole...) et le marché permet une gestion optimale de ces ressources.

⁵⁵ Selon Robert Solow (prix de la Banque de Suède en sciences économiques 1987), « le souci ancien au sujet de l'épuisement des ressources naturelles ne repose plus sur aucune base solide. Il est très facile de substituer d'autres facteurs aux ressources naturelles. Ainsi n'y a-t-il, en principe, aucun problème. Le monde peut, en effet, continuer sans ressources naturelles ; ainsi l'épuisement de celles-ci est tout juste une péripétie, non une catastrophe » (Sachs, 1991).

En effet, comme le rappelle Girmens (2006), le concept de rareté (le caractère limité des ressources à la disposition d'une société) est central en économie. Le paradigme néoclassique aboutit au résultat que le prix relatif (le rapport d'échange entre deux biens) est lié à la rareté des biens et que lorsqu'un bien devient rare, son prix augmente et la demande doit naturellement se déplacer vers d'autres biens (sous l'hypothèse, cruciale, qu'il existe des substituts au bien en question). Dans ce domaine, la contribution fondamentale est celle d'Hotelling (1931) qui a démontré que pour atteindre la condition d'équilibre⁵⁶, le prix des ressources non renouvelables devait correspondre à la somme du coût de production et de la rente de rareté (ou rente d'Hotelling), cette dernière devant augmenter à un taux égal à celui du taux d'actualisation. Par conséquent, au fur et à mesure que la quantité de ressource diminue, son prix augmente, favorisant l'émergence de solutions de substitution. De plus, si l'on considère qu'il est important qu'il n'y ait pas de décroissance du capital global entre les générations mais que la forme du capital que l'on laisse aux générations futures n'a pas d'importance (ressources, technologies ou savoir), alors l'augmentation des connaissances compenserait la diminution de ressources naturelles.

La confiance dans l'efficacité des mécanismes de marché et dans la substituabilité (qui est liée à la question, plus générale, du progrès technique) garantirait que chaque génération puisse satisfaire ses besoins. L'épuisement des ressources non renouvelables ne serait alors plus à considérer comme une externalité.

Toutefois, force est de constater que l'optimisme technologique n'est pas universellement partagé⁵⁷. De plus, en supposant que la rente de rareté est bel et bien prise en compte dans les prix des ressources, cette rente est touchée par les exploitants de ressource et non par les acteurs économiques lésés (les générations futures). Rien ne prouve que les rentes dégagées par l'épuisement des ressources soient réinvesties dans le capital technique, ou consacrées à la création d'externalités positives intergénérationnelles (subventions pour le recyclage...) et tout laisse à croire que l'épuisement des ressources non renouvelables reste une externalité intergénérationnelle.

Il n'existe pas, cependant, de travail de monétisation concernant l'épuisement des ressources fossiles et des matières premières. Comme le rappelle Girmens (2006), dans le cas qui nous intéresse (une externalité négative intergénérationnelle), le caractère non borné de l'horizon temporel de l'économie et l'infinité d'agents rendent le problème insoluble. Cette externalité ne sera donc pas prise en compte dans la suite de l'étude.

2.4.3 Monétisation des externalités liées au changement climatique

L'augmentation de la concentration dans l'atmosphère de certains gaz à effet de serre (GES) provenant d'émissions d'origine anthropique (CO₂, CH₄, N₂O...) entraîne l'accroissement de la température moyenne de l'atmosphère. S'il est impossible de prédire avec une certitude absolue quels seront les effets du changement climatique, les connaissances actuelles permettent d'en comprendre les risques. Le GIEC (Parry et al., 2007) donne ainsi des exemples d'incidences associés à la variation de la température moyenne à la surface du globe sachant que celles-ci varieront selon le degré d'adaptation, le rythme du réchauffement et le mode de développement socio-économique.

2.4.3.1. Les différentes méthodes de monétisation du coût marginal de réduction des émissions de GES

Il existe deux méthodes principales de monétisation des évaluations de GES. La méthode dite des « coûts des dommages » repose sur la monétisation des impacts du changement climatique. La méthode dite des « coûts de prévention » consiste à calculer le coût marginal que l'on devrait attribuer

⁵⁶ Pour laquelle l'offre égalise la demande.

⁵⁷ Vaclav Smil, par exemple : "Historical evidence is thus replete with examples demonstrating that substantial gains in conversions (or material use) efficiencies stimulated increases of fuel and electricity (or additional material) use that were far higher than the savings brought by these innovation" (Smil, 2005).

aux émissions de GES pour atteindre des cibles d'atténuation des émissions (ou en termes de limitation d'augmentation des températures). Ce dernier coût peut être interprété comme le prix d'un permis carbone dans un marché d'échange mondial et idéal.

2.4.3.2. Evaluation du coût marginal d'émissions de GES par la méthode des « coûts des dommages »

Méthode générale

Ce type d'approche relève de l'analyse coûts/avantages : la valeur de la tonne de carbone se mesure au regard de l'impact que l'émission de cette molécule supplémentaire aura sur le bien-être des générations actuelles et futures. La méthode généralement suivie consiste à effectuer une simulation de référence avec un modèle intégré du changement climatique puis une simulation « perturbée » en ajoutant une quantité donnée de carbone dans l'atmosphère (scénario d'émission) sur une certaine période. Le coût marginal est alors calculé en divisant la somme des dommages (sur des horizons temporels et géographiques donnés) par le nombre de tonnes de carbone émises.

Les modèles intégrés du changement climatique

Selon Ambrosi et Courtois (2004), les modèles intégrés du changement climatique cherchent à capturer, dans une architecture cohérente, la chaîne causale qui conduit des déterminants des émissions de gaz à effet de serre aux impacts du changement climatique et à leurs répercussions socioéconomiques. Il s'agit donc d'une approche interdisciplinaire, entre sciences de l'environnement (climatologie, océanographie, écologie. . .) et sciences sociales (économie, sciences et techniques de l'ingénieur...). Une typologie des modèles⁵⁸ a été effectuée par Rotmans et Dowlatabadi (1998).

Dommages étudiés

Les modèles ne couvrent pas tous les dommages et tous les coûts du changement climatique. Watkiss et *al.* (2005) ont analysé les impacts évalués par différentes études⁵⁹ afin de déterminer dans quelle mesure elles peuvent sous-estimer le dommage « total » du changement climatique. Les auteurs classent les impacts en neuf catégories selon :

- l'incertitude pesant sur leur probabilité d'occurrence : impacts prévisible⁶⁰ (hausse du niveau des mers), impacts pouvant varier⁶¹ (sécheresse, tempêtes), variables majeures⁶² (arrêt de la circulation thermohaline),
- l'incertitude pesant sur leur monétisation : dommages marchands (protection des côtes), dommages non marchands pour lesquels il existe un travail de monétisation (santé, écosystèmes), dommages non marchands pour lesquels il n'existe pas (ou peu) de travail de monétisation (conflits régionaux, pauvreté).

Il s'avère que la très grande majorité des études s'en tiennent à la prise en compte des dommages à la fois marchands et prévisibles (aucune étude ne prend en compte les dommages non marchands pour lesquels il n'existe pas (ou peu) de travail de monétisation et une seule intègre les variables majeures).

Ainsi, les modèles utilisés n'envisagent que les effets les mieux compris et les plus facilement monétisables. Selon les auteurs, il faut donc relativiser les résultats obtenus avec cette méthode, car ils sous estiment très probablement les dommages.

⁵⁸ Modèles d'orientation macro-économique : représentent sous forme de relations paramétriques relativement simples les phénomènes naturels ; modèles d'orientation géophysique : représentent de manière exhaustive les processus physiques étudiés.

⁵⁹ Les auteurs ont repris les études analysées par Tol (2005) dont les résultats en termes de coût marginaux de réduction des émissions sont présentés Figure 2.22.

⁶⁰ "Projection" dans le texte original.

⁶¹ "Bounded risks" dans le texte original.

⁶² "System change & surprises" dans le texte original.

Résultats et incertitudes

Concernant la monétisation du coût marginal d'émission de GES par la méthode de coût des dommages, l'étude la plus complète est celle de Tol (2005) qui effectue une méta-analyse portant sur 28 études d'estimation du coût du carbone (au final 103 estimations - Figure 2.22). Si toutes les études sont prises en compte, la médiane est de 14 \$/t et la moyenne de 93 \$/tC⁶³. Cependant, après analyse de toutes ces études (taux d'actualisation, robustesse des scénarios d'évolution du climat pris en compte...), l'auteur estime peu probable que le coût de dommage dépasse 50 \$/tC (avec notamment des hypothèses typiques d'actualisation).

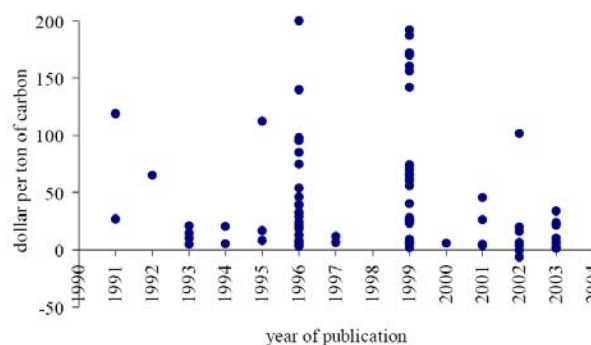


Figure 2.22. Coût marginal d'émission de gaz à effet de serre provenant de 28 études différentes (Tol, 2005)

La Figure 2.22 montre une grande disparité des résultats dont les causes principales résident dans :

- les scénarios d'émissions de GES retenus,
- le choix du taux d'actualisation,
- l'évaluation monétaire de la vie humaine et notamment la différence entre pays en voie de développement et pays riches,
- l'évaluation monétaire de la biodiversité et des écosystèmes,
- l'incertitude très élevées sur l'occurrence et les impacts d'événements tels que les cyclones, les sécheresses, l'augmentation du niveau de la mer.

Pour revenir sur l'importance du taux d'actualisation, les dommages évalués adviendront dans un futur éloigné et ont tendance à être minorés par le processus d'actualisation. Le Tableau 2.12 donne des valeurs de coût marginal d'émission obtenues dans le cadre du projet ExternE (CE, 2005a) avec différents taux d'actualisation. Il apparaît que ce coût varie très significativement (d'un facteur 15) en fonction du taux d'actualisation choisi.

Tableau 2.12. Coût marginal d'émissions obtenus pour différents taux d'actualisation (CE, 2005)

	Taux d'actualisation		
	0 %	1 %	3 %
Coût marginal d'émissions [\$/tC]	79,0	25,2	5,1

Enfin, il faut noter que le coût marginal d'émissions est d'autant plus faible que la concentration de GES est faible (et que l'objectif de réduction des émissions est élevé). Comme le montrent les résultats du rapport Stern (Tableau 2.13), les dommages seront moins importants si la concentration s'établit à 450 ppm que si elle augmente jusqu'à 550 ppm. En contrepartie, l'effort nécessaire pour atteindre ces niveaux sera lui plus important (et les coûts marginaux de réduction plus élevés).

Tableau 2.13. Coût des dommages obtenus par Stern (2006)

	Scénarios		
	Référence	Stabilisation 550 ppm	Stabilisation 450 ppm
Coût des dommages [\$/tC]	85	30	25

La méthode d'évaluation des dommages s'accompagne donc d'incertitudes importantes (quantification et monétisation) et est empreint d'une certaine subjectivité (taux d'actualisation). Selon Watkis et al. (2005), les dommages évalués par les études existantes sont très probablement sous-estimés et doivent être considérés avec prudence. A titre d'exemple, Stern (2006) évalue le coût de dommage entre 20 €/tCO₂ et 70 €/tCO₂.

⁶³ Avec un taux de conversion de 1,2 \$ pour 1 € (1990-2004), la moyenne est d'environ 77,5 €/tC soit 21 €/tCO₂.

2.4.3.3. Evaluation du coût marginal de réduction⁶⁴ des émissions de GES par la méthode des « coûts de prévention »

La seconde méthode, dite des « coûts de prévention » (ou « coûts de réduction »), consiste à évaluer le coût nécessaire pour stabiliser les émissions de GES à un niveau donné. Pour reprendre la typologie des méthodes de monétisation des externalités (section 2.2), cette méthode est en quelque sorte basée sur les préférences individuelles (détermination du consentement à payer) alors que celle présentée précédemment est fondée sur l'expertise des dommages.

L'évaluation du coût marginal de réduction peut s'effectuer sur la base des coûts de réduction sectoriels (analyse ascendante). Cela consiste en une analyse technico-économique des différentes options techniques s'offrant à la collectivité pour réduire les émissions de GES et notamment en un classement de ces options en fonction de leur potentiel de réduction des émissions et de leur coût marginal (la Figure 2.23 est donnée à titre d'exemple). La valeur du coût marginal du carbone retenue correspond alors au coût de la dernière option à utiliser pour satisfaire le niveau d'émissions autorisé. Ainsi, la collectivité est invitée à réaliser toutes les actions dont le coût est inférieur à cette valeur. Dans le cas de la Figure 2.23 par exemple, sachant que les émissions mondiales en 2030 seront d'environ 55,7 Gt de CO₂-eq selon le GIEC (Barker et al., 2007), si un objectif mondial de réduire les émissions de 35 % en 2030 était fixé, alors le coût marginal serait d'environ 10 €/tCO₂-eq.

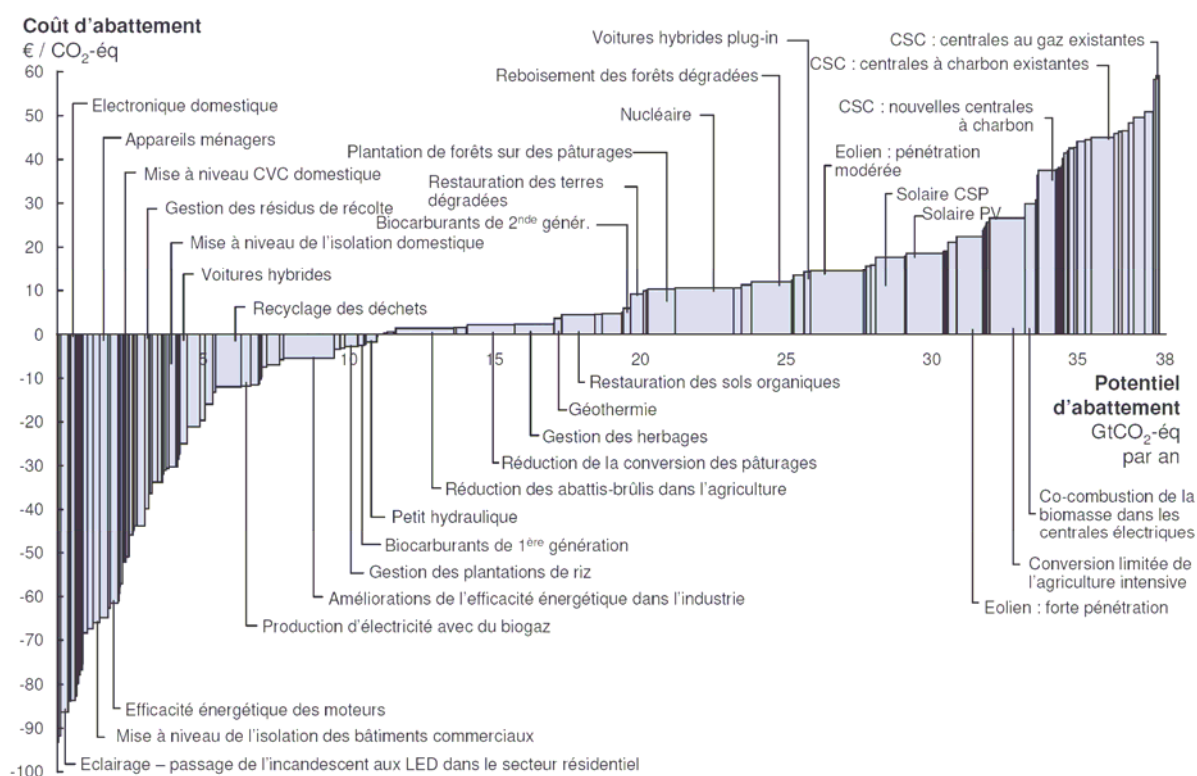


Figure 2.23. Courbe mondiale des coûts d'abattement des GES à horizon 2030 (McKinsey, 2009)

L'évaluation du coût marginal de réduction peut aussi être réalisée à partir de modèles macroéconomiques, qui synthétisent l'ensemble du système économique d'une région et calculent un coût du carbone cohérent avec un niveau des émissions à ne pas dépasser (analyse descendante). L'évolution des émissions est modélisée à partir de différentes variables économiques agrégées, les options technologiques étant représentées implicitement. Les valeurs produites par ces modèles traduisent le signal-prix qu'une économie doit « suivre » pour atteindre un objectif donné de réduction de ses émissions de gaz à effet de serre (Quinet et al., 2008).

⁶⁴ En anglais : abatement costs.

Kuik et *al.* (2009) ont récemment effectué une méta-analyse sur des études portant sur l'évaluation du coût marginal de réduction des émissions de GES par la méthode des « coûts de prévention ». Les principaux résultats sont donnés dans le Tableau 2.14. Les causes principales de la dispersion importantes des résultats obtenus résident dans :

- le choix de la cible de réduction des émissions (plus la contrainte sur les émissions est forte, plus les moyens de réduction à mobiliser sont importants et plus la valeur de la tonne de carbone est élevée),
- la détermination du scénario de référence (qui avec la cible détermine le niveau de réduction des émissions à atteindre),
- les hypothèses générales retenues dans les simulations (sur la croissance économique, la structure industrielle, les développements technologiques, le prix de l'énergie...),
- les gaz pris en compte (CO₂ uniquement ou plusieurs GES),
- le niveau d'agrégation des modèles : plus le nombre de régions est important, plus la représentation est réaliste en termes de rigidités et de spécificités,
- la différence de méthode adoptée (ascendante/descendante).

Tableau 2.14. Résumé des valeurs de coût marginal de réduction (€₂₀₀₅/tCO_{2-eq}) provenant de différents travaux (Kuik et *al.*, 2009)

Année de référence	2025	2050
Moyenne	24,8	55,8
Médiane	16,2	32,2
Maximum	119,9	209,4
Minimum	0,0	1,4
Ecart-type	27,9	52,9
Nombre de résultats analysés	47	49

Les travaux du groupe III du GIEC (Fisher et *al.*, 2007) comprennent une méta-analyse des principales études (publiées sur une période de cinq ans) portant sur les coûts de réduction dont la Figure 2.24 donne une synthèse. Fisher et *al.* (2007) concluent sur les valeurs de coûts marginaux suivantes, valeurs qui dépendent de l'objectif de stabilisation⁶⁵ :

- pour 2030, entre 18 et 85 \$/tCO_{2-eq} pour un scénario de stabilisation des concentrations à 550 ppm-eq ; et environ 100 \$/tCO_{2-eq} pour un scénario de stabilisation à 450 ppm-eq,
- pour 2050, entre 30 et 155 \$/tCO_{2-eq} pour un scénario à 550 ppm-eq et entre 100 et 300 \$/tCO_{2-eq} pour un scénario à 450 ppm-eq.

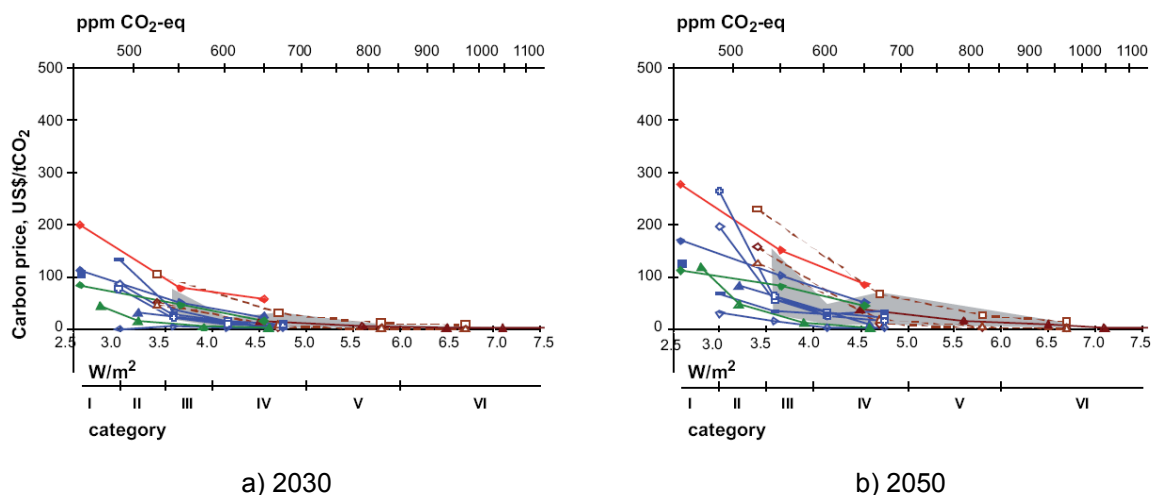


Figure 2.24. Prix du carbone en fonction des objectifs de réduction

⁶⁵ Selon le GIEC, l'augmentation de température moyenne du globe sera de l'ordre de 2,8 – 3,2 °C pour une concentration de 535-590 ppm-eq et de 2 – 2,4°C pour une stabilisation des concentrations à 445-490 ppm-eq.

2.4.3.4. Conclusions

Que ce soit par la méthode d'évaluation des dommages ou par la méthode d'évaluation du coût marginal de réduction, les résultats varient significativement selon les études. De façon générale, le coût de la tonne de CO_{2-eq} fluctue de moins de 10 € à plus de 200 €. Il est alors difficile de s'arrêter sur une valeur unique et des analyses de sensibilité devront être effectuées au moment d'utiliser ces données de coûts.

Le Tableau 2.15 regroupe les valeurs dérivées des méta-analyses effectuées par le GIEC (Figure 2.24) qui sont fonction des objectifs de réduction et de l'année de référence. L'objectif de stabilisation des émissions à 450 ppm-eq en 2050, qui correspond à une augmentation de température moyenne du globe de l'ordre de 2 °C, est conforme aux engagements politiques pris au niveau français et européen (ainsi qu'aux recommandations du GIEC). Pour la suite de l'étude, nous retiendrons donc comme valeur du coût marginal de la tonne de CO_{2-eq}, la valeur centrale rapportée par le GIEC pour cet objectif de stabilisation des émissions, c'est à dire 150 €/tCO_{2-eq}. Cette valeur élevée du carbone reflète le caractère ambitieux des objectifs européens de réduction des GES. Elle ne pourrait cependant être internalisée en l'état comme « signal prix » destiné aux consommateurs car cela poserait des problèmes de transition et d'adaptation importants (poids sur la croissance...) ⁶⁶. C'est pourquoi le Centre d'analyse stratégique (Quinet et al., 2008) recommande une trajectoire de la valeur du carbone partant de 32 €/tCO₂ en 2010 pour atteindre 100 €/tCO₂ en 2030, puis 200 €/tCO₂ en 2050.

Tableau 2.15. Valeurs de coûts marginaux de réduction provenant de méta-analyses

Sources	Objectifs [ppm-eq]	Années de référence	Coût marginal de réduction [€/tCO _{2-eq}] ⁶⁷		
			Min.	Centrale	Max.
(Fisher et al., 2007)	550	2030	13	38	63
	450	2030	65	106	148
	550	2050	22	68	115
	450	2050	74	148	222

2.4.4 Etude des externalités non-environnementales

2.4.4.1. Accidents liés aux filières énergétiques

Le projet ExternE (CE, 2005a) traite de la monétisation des accidents liés aux filières énergétiques. Ceux-ci sont définis comme des événements rares et indésirables par rapport au fonctionnement ordinaire. Une distinction est faite entre les accidents du travail et les accidents impactant le public (marée noire, accident nucléaire...).

En ce qui concerne la première catégorie, les auteurs d'ExternE notent que si les données statistiques sont généralement disponibles, il est souvent très difficile de juger en quelle mesure ce sont des coûts externes. En effet, les accidents du travail sont pour partie internalisés dans les coûts de production *via* les primes de risques (*ex-ante*) et les compensations versées aux victimes ou à leurs familles (*ex-post*). Sans informations, les auteurs d'ExternE supposent que 80 % des coûts liés aux accidents sont déjà internalisés, mais ne peuvent justifier cette hypothèse.

Les accidents publics peuvent en principe être monétisés en décrivant les accidents possibles, en calculant les dommages associés et en multipliant ceux-ci par la probabilité d'occurrence des accidents. Même si la question du degré d'internalisation dans les coûts du marché doit de nouveau être posée⁶⁸, la question essentielle reste celle de la prise en compte de l'aversion au risque. En effet,

⁶⁶ Toutefois, concernant le secteur du bâtiment, fixer un « signal prix » trop faible et orienter les mesures de réhabilitation vers l'exploitation des gisements à faible coût peut se révéler au final peu efficace économiquement dans l'objectif du Facteur 4 (Sidler, 2007).

⁶⁷ Avec, lorsque nécessaire, un taux de conversion de 1,35 \$ pour 1€ (2007).

⁶⁸ Les assurances souscrites (par les transporteurs de pétrole par exemple) sont répercutées dans les tarifs.

les accidents causant des dégâts très importants mais ayant une faible probabilité d'occurrence (accident nucléaire par exemple) sont considérés par le public comme plus problématiques que ceux provoquant des dégâts plus faibles mais dont la probabilité d'occurrence est plus élevée ; et pourtant, la monétisation est identique. Ainsi, l'occurrence d'un accident extrême doit être diminuée même si les coûts d'évitement sont plus élevés que la valeur attendue des dommages. Actuellement, il n'existe pas de consensus sur la façon de prendre en compte l'aversion au risque.

Face aux incertitudes méthodologiques importantes, il a été choisi de ne pas tenir compte des externalités liées aux accidents dans la suite de l'étude.

2.4.4.2. Amélioration ou dégradation de la sécurité énergétique

Selon l'Agence Internationale de l'énergie (2005), la sécurité énergétique peut être définie comme « la disponibilité d'énergie à tout moment dans des formes variées, en quantités suffisantes, et à des prix abordables ». Le sécurité énergétique d'une région n'est pas réductible à un seul indicateur mais peut être évaluée en analysant :

- son taux d'indépendance énergétique,
- la structure de son bilan énergétique (diversification énergétique),
- la provenance de ses approvisionnements (diversification géopolitique),
- ses capacités de stockage (pour contrer les aléas extérieurs de court terme).

Une trop faible sécurité énergétique s'accompagne de risques (à court ou long terme) d'interruption de la fourniture d'énergie (externalité technologique) ou d'augmentation des prix (externalité pécuniaire). Des dépenses publiques, qui ne sont généralement pas internalisées, sont souvent nécessaires pour assurer la sécurité énergétique. A titre d'exemple, Ogden et *al.* (2004) évaluent le montant des opérations de stabilisation militaires menées par les Etats-Unis entre 15 \$ et 44 \$ par baril de pétrole vendu dans ce pays.

Selon Egenhofer et *al.* (2006), hormis quelques exceptions aux périodes où les marchés font face à des contraintes d'approvisionnement de court terme, les risques de long terme ne sont pas pris en compte de façon adéquate dans les prix du gaz et du pétrole, et ce principalement pour les raisons suivantes :

- les prix du marché tendent à privilégier les aspects de court terme à ceux de long terme,
- la dépendance de l'Europe (envers une douzaine de pays exportateurs) est élevée et tend à augmenter plus encore. Cette même tendance se retrouve chez d'autres grands importateurs tels que les Etats-Unis ou la Chine. Ainsi, le pouvoir qu'ont les principaux fournisseurs sur le marché est déjà important et devrait augmenter à l'avenir,
- dans les principaux pays exportateurs, des monopoles d'Etat très proches des gouvernements sont en charge de l'extraction et de la vente des ressources nationales de gaz et de pétrole. Il est donc fort possible que ces gouvernements prennent des décisions commerciales qui soient rationnelles de leur point de vue politique, mais ne le soient pas d'un point de vue économique,
- une grande incertitude existe quant au taux actuel d'épuisement des réserves dans le monde.

Même si la sécurité énergétique et les coûts externes qui lui sont associés sont étudiés dans ExternE, aucune monétisation n'est proposée. Egenhofer et *al.* (2006) proposent, sans justification, les valeurs du Tableau 2.16 pour l'année 2003 (après 2003, une augmentation de 1 et 2 % par an est considérée pour, respectivement, les hypothèses basses et centrales). Ces valeurs sont arbitraires et selon les auteurs, doivent être discutées avec les preneurs de décisions. Les coûts externes associés à l'économie du pétrole sont plus élevés que pour le gaz (réserves plus importantes et moins concentrées), et ceux de l'uranium et du charbon peuvent être négligés (réserves plus nombreuses et mieux réparties, régimes politiques plus stables).

Tableau 2.16. Monétisation de la sécurité énergétique retenue pour 2003 (Egenhofer et *al.*, 2006)

	Hypothèse basse	Hypothèse centrale	Hypothèse haute
€/GJ de pétrole	0,5	1	3
\$/ baril de pétrole économisé	3	7	21
€/GJ de gaz	0,4	1	2

Face au caractère arbitraire des données collectées, nous avons choisi de ne pas tenir compte des externalités liées à la sécurité énergétique dans la suite de l'étude.

2.4.4.3. Créations ou destructions d'emplois

Le chômage s'accompagne d'un coût économique pour la société, notamment lié à la diminution des rentrées fiscales et à l'augmentation des dépenses passives (indemnisation du chômage, revenu minimum) ou actives (politiques de création d'emplois). Dans des économies, telles que la France, qui ne connaissent pas le plein emploi, la création d'emplois est une externalité positive si elle entraîne une réduction du taux de chômage.

Pour obtenir une vision d'ensemble concernant l'impact sur l'emploi d'une mesure visant à réduire les consommations d'énergie, il est nécessaire de prendre en compte :

- la création ou destruction d'emplois directs (directement induits par l'investissement des consommateurs) nécessaire pour : la fabrication des équipements, l'installation des équipements, la maintenance, etc.
- la création d'emplois indirects qui résulte des différents phénomènes suivants :
 - effet multiplicateur : besoins secondaires de biens et de services des entreprises directement sollicités par la mise en place des actions
 - effet de redistribution : les économies réalisées par les ménages sur la facture d'énergie sont redistribuées dans l'économie et potentiellement créatrices d'emplois
- les emplois supprimés ou non-crésés dans le secteur de la production énergétique suite à la diminution de la demande.

Ces données sont difficilement quantifiables et les résultats obtenus souvent controversés. Ainsi, selon Egenhofer et *al.* (2006), qui ont analysé plusieurs études concernant l'impact sur l'emploi de politiques de développement des énergies renouvelables ou de l'efficacité énergétique, tous les impacts sur l'emploi ne sont généralement pas pris en compte (seuls les emplois directs sont considérés par exemple) et les incertitudes sont quelque fois telles que même la conclusion quant au caractère positif ou négatif de l'impact de la mesure sur l'emploi ne leur semble pas robuste⁶⁹.

L'estimation des effets nets sur l'emploi est un exercice difficile qui ne sera pas réalisé dans ce travail. Toutefois, selon le Livre vert sur l'efficacité énergétique de la Commission européenne (CE, 2005b), les investissements pour l'amélioration de l'efficacité énergétique présentant un bon rapport coût-efficacité auront presque toujours un impact positif sur l'emploi. Selon cette même source, les investissements dans l'efficacité énergétique au stade de l'utilisation finale créeraient notamment trois à quatre fois plus d'emplois que des investissements comparables dans la production d'énergie classique.

2.4.4.4. Impacts sur le réseau électrique et les capacités de production

Selon leur contribution à la courbe de charge totale, l'utilisation de climatiseurs en refroidissement peut :

- aider à amortir des équipements existants dans des zones où le pic de demande est en hiver,
- générer un besoin d'investissement dans de nouvelles capacités de production et de transport d'électricité dans des zones où le pic de demande est déjà en été.

Dans le deuxième cas, les investissements à effectuer peuvent se répercuter sur le prix de vente du kilowattheure. L'installation d'un climatiseur peut donc s'accompagner de coûts externes négatifs selon les caractéristiques du réseau électrique.

Dans le cas d'une zone où les investissements nécessaires n'auraient pas été faits pour supporter une augmentation de la demande d'électricité due à la climatisation, l'utilisation de cette dernière peut

⁶⁹ Voir en France les critiques provoquées par la publication du chiffre de 600 000 emplois créés ou préservés d'ici 2020 par les mesures du Grenelle de l'environnement : l'hypothèse retenue concernant le prix du pétrole, le fait que les réajustements budgétaires des ménages ne soient pas pris en compte... (Baudet, 2009).

provoquer des coupures d'approvisionnement (voir un effondrement total du réseau (black out)) qui représentent aussi des coûts externes pour l'ensemble de la société. Ainsi, une étude menée en Suède estime le coût d'une coupure pour un ménage à environ 1 € lorsque celle-ci dure une heure et à 22 € pour une journée (Carlsson et Martinsson, 2004). Aux Pays-Bas, Baarsma et *al.* (2005) évaluent ces coûts respectivement à 5 € et 20 €. Ces monétisations sont basées sur une évaluation du consentement à payer des ménages.

L'évaluation des coûts externes relatifs au réseau d'électricité nécessiterait une étude spécifique de la situation française. Cet important travail ne sera pas réalisé lors de cette thèse.

2.4.5 Calcul des externalités associées à la consommation d'énergie

Nous avons vu au chapitre 1 que les impacts environnementaux évalués dans cette thèse comprendront ceux liés à la consommation d'énergie lors de la phase d'usage des équipements ainsi que les émissions directes de GES qui ne concernent que les climatiseurs. Ces dernières pouvant d'ores et déjà être monétisées grâce au travail présenté précédemment (partie 2.4.4), il nous reste à monétiser l'ensemble des externalités liées aux consommations d'électricité et de chauffage dans les bâtiments.

2.4.5.1. La consommation d'électricité

Coûts externes associés au kilowattheure électrique pour différents modes de production

Les bases de données « ecoinvent » fournissent les émissions de certains polluants par kilowattheure électrique produit, et ce, pour différents systèmes de production d'électricité et pour l'ensemble de leur cycle de vie (Tableau 2.17). La production d'origine nucléaire n'est pas considérée dans ce tableau mais nous avons décidé dans la partie 2.4.2.2 d'attribuer un coût externe de 0,19 €cts à la production d'un kilowattheure d'origine nucléaire.

Tableau 2.17. Emissions de polluants associées à différents systèmes de production d'électricité

	Emissions en g par kWh électrique							
	Charbon Lignite	Charbon PFBC ⁷⁰	Fioul	Fioul CC ⁷¹	Gaz	Gaz CC	Hydrau.	Eolien onshore
CO ₂ -eq	1230	798	882	526	640	423	3,7	10,5
SO ₂	6,95	0,276	6,61	1,06	0,219	0,147	4,15.10 ⁻³	3,81.10 ⁻³
NO _x	1,49	0,386	2,82	0,521	0,720	0,329	2,87.10 ⁻²	3,85.10 ⁻²
PM _{2,5}	0,508	4,24.10 ⁻²	0,145	3,09.10 ⁻²	1,46.10 ⁻²	1,07.10 ⁻²	1,46.10 ⁻²	1,18.10 ⁻²
COV	4,01.10 ⁻²	5,45.10 ⁻²	0,396	0,243	0,272	0,181	4,34.10 ⁻³	9,03.10 ⁻³

Si les indices d'impact précédemment présentés (Tableau 2.11) permettent de calculer les coûts externes par kilowattheure produit, la monétisation des externalités par kilowattheure consommé nécessite d'intégrer les pertes de réseaux qui sont de l'ordre de 7 % selon RTE (2009). Les résultats, présentés sur la Figure 2.25, montrent une forte disparité entre les différents moyens de production ; il existe en effet un rapport 100 entre les coûts externes associés au charbon et ceux liés aux renouvelables ou au nucléaire. En raison de leurs importantes émissions de GES, les sources fossiles se voient associer les coûts externes les plus élevés.

A titre indicatif, le prix moyen du kilowattheure usager (résidentiel et petit tertiaire) en Europe est de l'ordre de 14,5 €cts selon Rivière et *al.* (2009). L'internalisation des coûts externes augmenterait ce prix de 0,7 % dans le cas d'une production d'origine hydraulique et jusqu'à 150 % dans le cas d'une production d'origine fossile.

⁷⁰ Combustion pressurisée à lit fluidisé.

⁷¹ Centrale à cycle combiné.

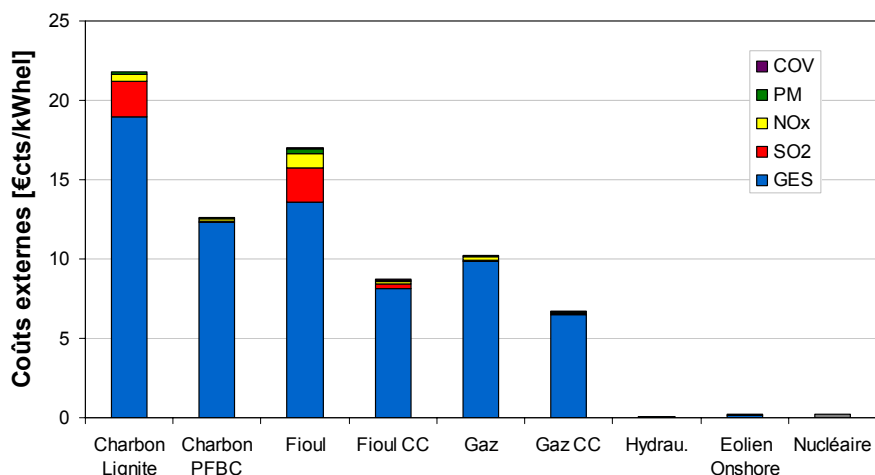


Figure 2.25. Coûts externes associés à la consommation d'un kWh électrique en fonction du mode de production

La prise en compte du mix électrique français

En prenant en compte la part que représente chaque mode de production dans le mix électrique français, nous aboutissons à un coût externe moyen s'élevant à environ 1 €cts par kilowattheure consommé (Tableau 2.18). Les coûts externes varient donc fortement selon que l'on considère la moyenne annuelle sur l'ensemble des modes de production ou les différents modes séparément.

Tableau 2.18. Calcul du coût externe associé au mix électrique français

Modes de production	Part du mix électrique	Coûts externes considéré [€cts par kWh consommé]
Nucléaire	83 %	0,2
Hydraulique	7,5 %	0,1
Charbon	3,1 %	17,2
Gaz	3 %	8,5
Autres renouvelables	1,8 %	0,2
Fioul	1,4 %	12,8
Autres	0,2 %	-
Moyenne du mix français		~ 1

Interconnexion des systèmes de production nationaux

En considérant le mix électrique européen, nous aboutissons à un coût externe moyen de l'ordre de 7,5 €cts par kilowattheure consommé (Tableau 2.19), ce qui est beaucoup plus élevé que la valeur déterminée dans le contexte français. Or, depuis la création du marché unique de l'électricité, l'affichage des offres sur les bourses de l'électricité permet de connaître et de solliciter à chaque instant le moyen de production le moins coûteux disponible quelle que soit sa situation sur le réseau interconnecté européen (sauf congestion de réseaux). Aussi, le coût externe du kilowattheure consommé en France se situe-t-il en moyenne entre 1 €cts et 7,5 €cts selon nos hypothèses.

Tableau 2.19. Calcul du coût externe associé au mix électrique européen (source : AIE, 2007)

Modes de production	Part du mix électrique	Coûts externes considéré €cts par kWh consommé
Nucléaire	26 %	0,2
Hydraulique	15 %	0,1
Charbon	28 %	17,2
Gaz	22 %	8,5
Autres renouvelables	6 %	0,2
Fioul	3 %	12,8
Moyenne du mix européen		~ 7,5

L'approche marginale

La mise en fonctionnement des différents modes de production s'effectue en respectant leur efficacité économique. De façon très schématique, il est d'abord fait appel aux systèmes de production fatale (éolien, fil de l'eau), puis au nucléaire, et enfin aux énergies fossiles (charbon, gaz et fioul). A chaque instant, un accroissement de la demande se traduit ainsi par la sollicitation du moyen de production le moins cher disponible à la hausse. Inversement, une baisse de la demande est compensée par la réduction de la puissance du moyen le plus cher démarré (mode de production marginal).

Dans un contexte de marché unique de l'électricité, l'économie en France d'un kilowattheure électrique est donc fortement susceptible d'éviter la production d'un kilowattheure d'origine thermique en Europe, que ce soit en période de pointe ou de marginalité nucléaire. Aussi les coûts externes associés aux kilowattheures évités sont-ils plus élevés que le coût moyen basé sur le mix électrique français. Il nous est cependant difficile de progresser plus en détail dans l'évaluation des coûts externes d'un kilowattheure économisé car l'impact d'une mesure d'efficacité ou de sobriété énergétique sur l'utilisation des différents modes de production électrique est une question très complexe qui dépend notamment du volume des économies engendrées (ou des consommations évitées) et des périodes pendant lesquelles celles-ci sont réalisées (modes de production utilisés, modes disponibles).

Coût externe retenu

L'interconnexion des systèmes de production nationaux et la gestion des différents modes de production laissent à penser que, dans un contexte de réduction des consommations d'énergie, les coûts externes associés à la consommation d'un kilowattheure électrique sont supérieurs à la valeur moyenne basée sur le mix électrique français. Nous avons donc décidé de retenir une valeur de 5 €cts par kilowattheure consommé.

Coûts externes à horizon 2050

A quoi ressembleront les parcs de production électrique français et européens en 2050 ? Les exercices de prospective aboutissent à des résultats extrêmement différents selon les hypothèses retenues en réponse aux questions suivantes :

- Comment évoluera la demande d'électricité (part de l'électricité dans les transports, impact des politiques d'efficacité et de sobriété énergétique...) ?
- Comment se développeront les réseaux (interconnexions, réseaux «intelligents»...) ?
- Quels seront les progrès en termes de capture et de stockage de CO₂ ?
- A quoi ressemblera le bouquet énergétique ?
- Quelle sera l'évolution du prix des énergies fossiles ?

Un tel exercice de prospective n'entre pas dans le cadre de la présente thèse. Dans notre cas, si la climatisation devait augmenter fortement en raison du changement climatique, cela formerait une pointe de consommation en été. Cette pointe sera vraisemblablement moins carbonée qu'actuellement (remplacement des centrales au charbon les plus polluantes, part des renouvelables) mais toujours à base de centrales thermiques qui sont les moyens les plus faciles à effacer et à relancer et qui permettent donc la flexibilité nécessaire.

En plus des incertitudes pesant sur le parc électrique, le montant des externalités associées aux différents moyens de production évoluera. Des progrès en termes de réduction des pollutions mais aussi de médecine les feront diminuer. D'autre part, le coût de la tonne de CO₂ aura changé selon la trajectoire empruntée par l'humanité (concentration de GES dans l'atmosphère, évolution des objectifs de limitation des concentrations).

Devant toutes ces incertitudes, il est supposé que le montant des externalités n'évolue pas avec le temps et reste égal à 5 €cts par kilowattheure consommé.

2.4.5.2. La consommation de chauffage

Les bases de données « Ecoinvent » fournissent les émissions de polluants émises par kilowattheure thermique, et ce, pour différents systèmes de chauffage et pour l'ensemble de leur cycle de vie (Tableau 2.20).

Tableau 2.20. Emissions de polluants associées à différents systèmes de production de chauffage⁷²

	Emissions en g par kWh thermique		
	Gaz naturel – Chaudière à modulation <100 kW	Fioul « léger » à condensation et sans modulation 100 kW	Granulés bois 50 kW
CO _{2-eg}	75,3	89	7,09
SO ₂	$3,67 \cdot 10^{-2}$	0,125	0,126
NO _x	$4,75 \cdot 10^{-2}$	$8,82 \cdot 10^{-2}$	0,21
PM _{2,5}	$1,92 \cdot 10^{-3}$	$5,79 \cdot 10^{-3}$	$5,11 \cdot 10^{-2}$
COV	$4,30 \cdot 10^{-2}$	$5,25 \cdot 10^{-2}$	$2,72 \cdot 10^{-2}$

Les indices d'impact précédemment présentés (Tableau 2.11) permettent de calculer les coûts externes par kilowattheure produit par chacun des trois modes de chauffage (Figure 2.26). Les GES représentent environ 95 % des coûts externes des chaudières fonctionnant au gaz et au fioul qui voient leurs coûts externes s'élever à 1,09 et 1,33 €cts/kWh_{th}. Les coûts associés au bois sont moins élevés, 30 €cts/kWh_{th}, et sont pour 33 % liés aux GES, 33 % aux particules et 20 % aux NO_x.

Les coûts externes associés à la consommation d'un kilowattheure thermique sont compris entre 0,3 et 1,3 €cts/kWh_{th} selon le moyen de chauffage. Il est supposé que ces montants n'évoluent pas avec le temps.

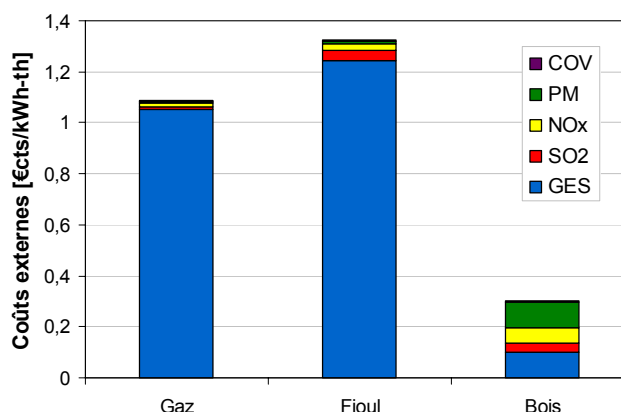


Figure 2.26. Coûts externes associés à la consommation d'un kWh thermique

⁷² Les bases de données « Ecoinvent » fournissent les données pour d'autres modes de chauffage mais les résultats ne varient que très peu pour un combustible donné (les coûts externes finals diffèrent d'au plus 5 %).

2.5 Conclusion : récapitulatif des méthodes retenues pour la suite de l'étude quant à l'évaluation et la monétisation de l'inconfort et des externalités

Ce chapitre 2 est une première étape vers l'évaluation technico-économique de solutions d'amélioration du confort d'été. Nous y avons analysé les normes d'évaluation du confort thermique actuellement utilisées, et développé des méthodes permettant de monétiser les coûts d'inconfort et les externalités. Nous revenons ci-après sur ces différents points.

Méthode d'évaluation du confort thermique

Dans cette étude, l'évaluation du service énergétique reposera sur les zones de confort telles que définies dans la dernière norme d'évaluation du confort thermique, la norme EN 15251 (CEN, 2007), pour un niveau de confort de catégorie II.

Pour les bâtiments climatisés, les valeurs par défaut basées sur l'approche analytique sont retenues. Pour des bâtiments de bureaux ou résidentiels, la température opérative maximale autorisée en été est alors de 26 °C, la température minimale de 20 °C.

En ce qui concerne les bâtiments non climatisés, la zone de confort adaptative telle que définie dans la norme (Figure 2.8) est donc retenue. Les températures opératives minimale et maximale autorisées en été (équation (2.19) et équation (2.20)) dépendent alors de la température journalière en moyenne glissante (équation (2.21)).

$$T_{min} = 0,33 \cdot \Theta_{rm} + 15,8 \quad (2.19)$$

$$T_{max} = 0,33 \cdot \Theta_{rm} + 21,8 \quad (2.20)$$

$$\Theta_{rm} = 0,2 \cdot \Theta_{ed-1} + 0,8 \cdot \Theta_{rm-1} \quad (2.21)$$

Avec : Θ_{rm} , la température moyenne glissante du jour [°C]

Θ_{rm-1} , la température moyenne glissante de la veille [°C]

Θ_{ed-1} , la température moyenne journalière extérieure de la veille (Θ_{ed-2} , celle de l'avant veille) [°C]

Selon la norme EN 15251, les zones de confort peuvent être étendues pour tenir compte de l'effet des vitesses d'air sur le confort (partie 2.1.3.3).

Méthodes de monétisation des coûts d'inconfort

Le coût d'inconfort thermique est de 60 €cts par degré-heure d'inconfort et par occupant. Les degrés-heure d'inconfort sont évalués à partir des zones de confort précédemment définies.

En ce qui concerne l'inconfort sonore, la valeur retenue pour la suite de l'étude est de 10,4 €/dB(A)/personne/an. Des analyses de sensibilité pourront être effectuées pour différents niveaux de pollutions sonores.

Coûts externes retenus pour la suite

Les impacts environnementaux évalués dans cette thèse comprendront ceux liés à la consommation d'énergie lors de la phase d'usage des équipements ainsi que les émissions directes de GES qui ne concernent que les climatiseurs.

Les coûts externes sont fixés à 150 € par tonne de CO_{2-eq} émise et à 5 €cts par kilowattheure électrique consommé. Concernant l'énergie de chauffage, ces coûts externes sont de l'ordre de 1 €cts par kilowattheure thermique consommé et varient selon l'énergie utilisée (gaz, bois).

Chapitre 3. Etude d'actions d'amélioration du confort d'été portant sur l'enveloppe et l'usage du bâtiment

Table des matières

CHAPITRE 3. ETUDE D'ACTIONS D'AMELIORATION DU CONFORT D'ETE PORTANT SUR L'ENVELOPPE ET L'USAGE DU BATIMENT **91**

TABLE DES MATIERES	93
INTRODUCTION	95
3.1 DEVELOPPEMENT D'UNE METHODOLOGIE D'EVALUATION DES ACTIONS PORTANT SUR L'ENVELOPPE ET L'USAGE DES BATIMENTS	97
3.1.1 DESCRIPTION GENERALE DE L'APPROCHE D'EVALUATION ADOPTEE	97
3.1.2 SPECIFICATION DE L'ENVIRONNEMENT DE SIMULATION	98
3.1.3 SELECTION DES ACTIONS A EVALUER DANS LE CADRE DE CE CHAPITRE	104
3.2 ETUDE DU POTENTIEL D'ACTIONS PORTANT SUR L'ENVELOPPE ET L'USAGE DU BATIMENT EN TERMES DE REDUCTION DES BESOINS DE REFROIDISSEMENT ET D'AMELIORATION DU CONFORT ESTIVAL	108
3.2.1 ETUDE DES BESOINS D'ENERGIE ET DU CONFORT ESTIVAL DANS LES PIECES DE REFERENCE	108
3.2.2 SPECIFICATION TECHNIQUE DES ACTIONS ETUDIEES DANS LE SECTEUR TERTIAIRE	113
3.2.3 POTENTIEL D'AMELIORATION DU CONFORT D'ETE DANS LE SECTEUR TERTIAIRE	116
3.2.4 DESCRIPTION TECHNIQUE DES ACTIONS ETUDIEES POUR LE RESIDENTIEL	120
3.2.5 POTENTIEL DE REDUCTION DES BESOINS DE REFROIDISSEMENT ET D'AMELIORATION DU CONFORT DANS LE SECTEUR RESIDENTIEL	122
3.3 ETUDE DU CONFORT D'ETE DANS LES BATIMENTS RENOVES DANS UNE OPTIQUE DE REDUCTION DES CONSOMMATIONS DE CHAUFFAGE	124
3.3.1 IMPACT D'ACTIONS DE RENOVATION ORIENTEES « CHAUFFAGE » SUR LE CONFORT D'ETE	124
3.3.2 AMELIORATION DU CONFORT D'ETE DANS LES BATIMENTS RENOVES	128
3.3.3 CONCLUSIONS	132
3.4 CONFORT D'ETE ET PERSPECTIVE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE	133
3.4.1 CHANGEMENT CLIMATIQUE : ADAPTATION ET ATTENUATION	133
3.4.2 PRESENTATION DES FICHIERS CLIMATIQUES UTILISES	135
3.4.3 IMPACT SUR LA DEMANDE D'ENERGIE ET LE CONFORT D'ETE	136
3.5 EVALUATION DES COUTS GENERALISES ASSOCIES AUX ACTIONS D'AMELIORATION DU CONFORT D'ETE	139
3.5.1 HYPOTHESES DE COUTS CONCERNANT LES BIENS MARCHANDS LIES A L'AMELIORATION DU CONFORT D'ETE	139
3.5.2 EVALUATION DES COUTS D'INCONFORT	142
3.6 CONCLUSIONS ET PREMIERES RECOMMANDATIONS	146

Introduction

Dans ce travail de thèse, nous avons décidé d'étudier séparément, d'une part, les actions portant sur l'enveloppe et l'usage des bâtiments (chapitre 3), et d'autre part, les appareils de climatisation (chapitre 4). Les résultats obtenus seront ensuite rassemblés au chapitre 5 dans le but de réaliser une analyse technico-économique des différentes options permettant d'améliorer le confort d'été.

L'objet du présent chapitre est d'étudier des actions d'amélioration du confort d'été portant sur l'enveloppe et l'usage des bâtiments en cherchant à évaluer leur potentiel en termes de diminution des besoins de refroidissement dans les bâtiments climatisés, et de réduction de l'inconfort estival dans les bâtiments non climatisés qui représentent aujourd'hui la majorité du parc.

Dans un premier temps, nous devons développer une méthodologie d'évaluation des actions reposant sur la simulation dynamique de bâtiments, approche pour laquelle nous avons opté au chapitre 1. La spécification d'un environnement de simulation constitue donc une étape préalable à la quantification du potentiel d'amélioration du confort d'été des différentes actions étudiées dans ce chapitre.

Un des objectifs de la thèse est d'effectuer une analyse prospective de l'impact de la climatisation individuelle en France à horizon 2050. Aussi, une fois le travail d'évaluation des actions réalisé dans le contexte actuel, nous intéresserons-nous à l'impact du changement climatique et du renforcement de l'isolation des bâtiments sur les résultats obtenus.

Enfin, dans le but de réaliser une comparaison technico-économique des différentes options d'amélioration du confort d'été au chapitre 5, nous conclurons ce chapitre 3 en caractérisant, en termes de coûts, les différentes actions ayant été étudiées au cours du chapitre. Nous profiterons de ce travail pour appliquer les méthodes de monétisation définies au chapitre 2 et quantifier les coûts d'inconfort dans les bâtiments non climatisés.

3.1 Développement d'une méthodologie d'évaluation des actions portant sur l'enveloppe et l'usage des bâtiments

3.1.1 Description générale de l'approche d'évaluation adoptée

3.1.1.1. Une approche par la simulation

Nous avons opté, au chapitre 1, pour que l'évaluation des solutions d'enveloppe et d'usage des bâtiments repose sur une approche par simulations dynamiques de bâtiments.

Si la réduction des consommations de climatisation requiert une diminution des besoins de refroidissement dans les bâtiments climatisés, elle suppose aussi une amélioration du confort estival dans les bâtiments non climatisés, et ce, dans le but de réduire le taux de pénétration de cet usage. **Nous évaluerons donc le potentiel des actions portant sur l'enveloppe et l'usage des bâtiments, à la fois dans les bâtiments climatisés et dans les bâtiments qui ne le sont pas.** En ce qui concerne les bâtiments non climatisés, nous nous sommes concentrés sur ceux équipés de fenêtres ouvrables et n'avons pas considéré ceux qui ne pouvaient être ventilés naturellement.

L'adoption d'une approche reposant sur la simulation dynamique nécessite la définition d'un environnement de simulation et notamment la détermination d'outils adaptés et la spécification de bâtiments et de climats de référence (partie 3.1.2).

3.1.1.2. Résultats attendus

Bâtiments climatisés

Dans le cas des bâtiments climatisés, nous avons vu au chapitre 1 que les résultats étaient attendus sous forme :

- de besoins de refroidissement qui permettront le calcul des consommations d'électricité des climatiseurs, une fois l'efficacité saisonnière des appareils étudiée (chapitre 4),
- de besoins de chauffage et de consommation d'électricité spécifique, qui permettront la prise en compte des interactions inter-usages lors de la comparaison des différentes solutions d'amélioration du confort d'été (chapitre 5).

Bâtiment non climatisés

Au chapitre 2, nous avons développé une méthode de monétisation de l'inconfort thermique basée sur les degrés-heures d'inconfort par rapport à la zone de confort adaptative. Cette unité fonctionnelle doit donc être évaluée dans les bâtiments non climatisés. Pour autant, la qualité du confort intérieur reste difficile à appréhender si l'on se base uniquement sur cette unité fonctionnelle. C'est pourquoi nous calculerons également la proportion d'heures d'occupation inconfortables par rapport à la zone de confort adaptative (définie au chapitre 2 à partir de la norme 15251 (CEN, 2007a)) et comparerons nos résultats à un critère de confort. Nous considérerons, arbitrairement, que l'ambiance intérieure d'un local remplit le critère de confort lorsque sa température opérative dépasse les limites de la zone de confort pendant moins de 3 % de la période d'occupation annuelle. Ceci permettra au lecteur de mieux apprécier les évaluations du confort intérieur.

Dans le cas des bâtiments non climatisés, les résultats sont donc attendus sous forme :

- de degrés-heures d'inconfort par rapport à la zone de confort adaptative,
- du pourcentage d'heures d'occupation inconfortables par rapport à la zone de confort adaptative,
- de besoins de chauffage et de consommation d'électricité spécifique, qui permettront la prise en compte des interactions inter-usages lors de la comparaison des différentes solutions d'amélioration du confort d'été (chapitre 5).

3.1.1.3. L'étude de l'influence des rénovations orientées chauffage et du changement climatique

L'objectif étant d'étudier l'impact de la climatisation à l'horizon 2050, ce travail de thèse doit tenir compte de l'évolution dans le temps de certains paramètres technico-économiques. Dans le cas de l'étude des besoins de refroidissement et de l'inconfort d'été, il apparaît important d'introduire l'impact du changement climatique et d'une isolation renforcée des bâtiments sur l'inconfort estival et la demande de climatisation. L'isolation thermique des bâtiments, nécessaire pour réduire les consommations de chauffage, peut en effet piéger les apports de chaleur intérieurs et extérieurs, provoquant ainsi une détérioration importante du confort estival.

3.1.2 Spécification de l'environnement de simulation

3.1.2.1. Choix du logiciel de simulation dynamique des bâtiments

Dans le présent chapitre, le logiciel TRNSYS, qui permet un calcul des équilibres thermiques dans le bâtiment au pas de temps horaire, a été utilisé comme outil de simulation dynamique. L'extension TRNFLOW a été employée pour intégrer la composante aéraulique qui est nécessaire à l'étude de la ventilation naturelle dans les bâtiments. Cet outil de simulation permet de définir et de calculer les circulations d'air dans un bâtiment multizones en fonction des conditions extérieures, des conditions intérieures et des équipements aérauliques de chaque zone. En revanche, il faut être conscient qu'il ne permet pas d'évaluer les contraintes liées au microclimat urbain (évaluation de la vitesse d'air extérieure en milieu dense par exemple) et que les résultats obtenus correspondent à des sites dégagés. Des outils existent pour évaluer le potentiel de ventilation naturelle pour des bâtiments situés en site urbain (voir par exemple les travaux d'Allard et Ghiaus (2004) développés dans le cadre du projet URBVENT), mais ils ne seront pas utilisés ici.

3.1.2.2. Définition de pièces de référence

Si les bâtiments de référence sont censés représenter la réalité de terrain, l'hétérogénéité du parc bâti rend cet exercice illusoire. Il faut être conscient que les cas de référence sont une abstraction réfléchie de la réalité, rendue notamment nécessaire pour des raisons pratiques de temps et d'intelligibilité des résultats, et que leur définition est susceptible de soulever des interrogations qui ne peuvent pas toujours être résolues de façon satisfaisante.

Secteurs retenus

Afin de définir des bâtiments de référence, nous avons choisi de diviser le parc en trois secteurs principaux que sont les résidences, les commerces et les bureaux. Les données de vente fournies par l'organisme BSRIA (2005) reposent sur la même catégorisation (Tableau 3.1) et il apparaît qu'en France, le secteur des bureaux représente environ 60 % du nombre d'appareils vendus contre respectivement 30 et 10 % pour les commerces et les résidences.

Tableau 3.1. Répartition des ventes de climatiseurs individuels en France (BSRIA, 2005)

	Résidences	Bureaux	Commerces
Réversible	48966	284566	150318
Refroidissement seul	7632	44351	23428
Total	56598	328917	173746
	10 %	59 %	31 %

Les climatiseurs individuels étant utilisés pour la climatisation pièce par pièce, nous avons défini une pièce de référence pour chacun des trois secteurs retenus. Les caractéristiques géométriques de ces dernières sont présentées ci-après ainsi que celles des bâtiments dans leur ensemble. Cette définition des bâtiments est nécessaire car elle influence les conditions climatiques à l'intérieur des pièces de référence, notamment lorsque l'on a recours à la ventilation naturelle.

Bureau

Le bureau de référence est un bâtiment de 1008 m², répartis sur deux étages, dont le plan des zones thermiques est donné Figure 3.1. La surface vitrée, qui représente 30 % de la surface verticale totale des parois extérieures, est répartie comme indiqué dans le Tableau 3.2.

La pièce de référence étudiée est la pièce de bureau orientée sud-ouest, située au deuxième étage.

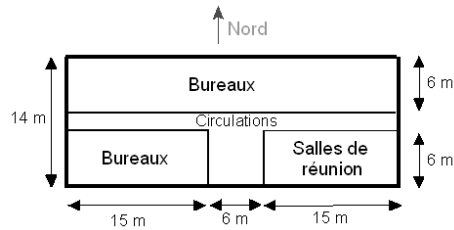


Figure 3.1. Description géométrique d'un étage du bâtiment de bureau simulé

Tableau 3.2. Description des zones thermiques formant un étage du bâtiment de bureaux

Zones thermiques	Surface [m ²]	Volume [m ³]	Surface verticale totale [m ²]				Surface verticale vitrée [m ²]			
			N	S	E	O	N	S	E	O
1-WC	15	40,5	6,8	0	16,2	0	3,8	0	0	0
2-Bureau	90	243	0	40,5	0	16,2	0	22,5	0	0
3-Bureau	201	542,7	110,5	0	0	16,2	30,3	0	0	0
4-Salle de conférence	90	243	0	40,5	16,2	0	0	22,5	0	0
5-Couloirs	108	291,6	0	16,2	5,4	5,4	0	9,0	0	0

Boutique

En ce qui concerne les commerces, la pièce étudiée est une boutique modélisée comme une seule zone thermique. La surface au sol est de 60 m², les parois nord et sud sont en contact avec l'extérieur, les autres parois étant en contact avec des zones thermiques aux conditions aux limites identiques (Figure 3.2). La hauteur sous plafond est de 3 m et l'unique surface vitrée, positionnée sur la façade Sud, couvre 15 m².

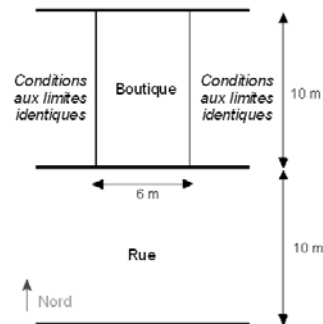


Figure 3.2. Dimensions de la boutique

Résidence

Le bâtiment résidentiel est un appartement de 100 m² situé au 6^{ème} et dernier étage d'un immeuble. Les faces orientées sud et ouest sont en contact avec l'extérieur alors que les conditions aux limites sont identiques pour les autres parois. Dans la suite, il est considéré que la chambre notée 1 sur la Figure 3.3 est la pièce climatisée. La surface vitrée de cette pièce représente 35 % de la surface verticale des parois extérieures, elle est répartie comme indiqué dans le Tableau 3.3.

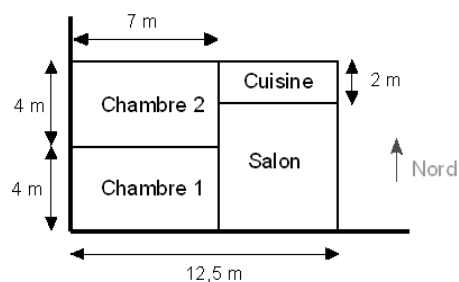


Figure 3.3. Description de l'appartement

Tableau 3.3. Description des zones thermiques

Zones thermiques	Surface [m ²]	Volume [m ³]	Surface verticale totale [m ²]				Surface verticale vitrée [m ²]			
			N	S	E	O	N	S	E	O
1-Chambre	28	70	0	17,5	0	10	0	7,5	0	2
2-Chambre	28	70	17,5	0	0	10	0	0	0	6
3- Salle de vie	33	82,5	0	13,75	15	0	0	5	0	0
4- Cuisine	11	27,5	13,75	0	5	0	0	0	0	0

Estimation des caractéristiques thermiques moyennes des bâtiments

Les coefficients de déperdition thermique du parc de bâtiments existants sont extrêmement hétérogènes. Les valeurs retenues ici correspondent à des bâtiments construits vers 1990 d'après l'analyse des réglementation thermique de l'époque (Adnot et *al.*, 2005), elles sont rassemblées dans le Tableau 3.4.

Tableau 3.4. Description des parois et coefficients de déperdition thermique retenus pour l'étude

	U [W/m ² .K]	Description (extérieur – intérieur)
Murs extérieurs	0,8	Ciment 0,13 m ($r=1900 \text{ kg/m}^3$, $\lambda=0,58 \text{ W/(m.K)}$, $c_p=1000 \text{ J/(kg.K)}$) Isolant 0,024 m ($r=56 \text{ kg/m}^3$, $\lambda=0,029 \text{ W/(m.K)}$, $c_p=1220 \text{ J/(kg.K)}$) Plâtre 0,012m ($r=1860 \text{ kg/m}^3$, $\lambda=0,72 \text{ W/(m.K)}$, $c_p=840 \text{ J/(kg.K)}$)
Fenêtres	3	Double vitrage 4/8/4
Toit	0,4	Ciment 0,13 m ($r=1900 \text{ kg/m}^3$, $\lambda=0,58 \text{ W/(m.K)}$, $c_p=1000 \text{ J/(kg.K)}$) Isolant 0,06 m ($r=56 \text{ kg/m}^3$, $\lambda=0,029 \text{ W/(m.K)}$, $c_p=1220 \text{ J/(kg.K)}$) Plâtre 0,012m ($r=1860 \text{ kg/m}^3$, $\lambda=0,72 \text{ W/(m.K)}$, $c_p=840 \text{ J/(kg.K)}$)
Sol	0,4	Ciment 0,13 m ($r=1900 \text{ kg/m}^3$, $\lambda=0,58 \text{ W/(m.K)}$, $c_p=1000 \text{ J/(kg.K)}$) Isolant 0,06 m ($r=56 \text{ kg/m}^3$, $\lambda=0,029 \text{ W/(m.K)}$, $c_p=1220 \text{ J/(kg.K)}$) Plâtre 0,012m ($r=1860 \text{ kg/m}^3$, $\lambda=0,72 \text{ W/(m.K)}$, $c_p=840 \text{ J/(kg.K)}$)

A titre de comparaison, ces valeurs, retenues ici pour les trois bâtiments de référence, sont en accord avec les coefficients de déperdition thermique déterminés par Petersdorff et *al.* (2004) dans le cadre d'une étude sur l'impact de la directive EPBD en Europe (Tableau 3.5).

Tableau 3.5. Coefficients de déperdition thermique Zone climatique modérée (Petersdorff et *al.*, 2004)

	1975 - 1990	1991 – 2002
Murs extérieurs	1	0,5
Fenêtres	3,5	2
Toit	0,5	0,4
Sol	0,8	0,5

Les taux de ventilation ainsi que les taux d'infiltration due à la perméabilité de l'enveloppe sont rassemblés dans le Tableau 3.6 pour les trois cas de référence.

Tableau 3.6. Taux de ventilation et d'infiltration

	Bureau	Résidence	Boutique
Ventilation	25 m ³ /h/occupant (pièces de bureau) 30 m ³ /h/occupant (salle de conférence)	20 m ³ /h/occupant	25 m ³ /h/occupant
Infiltration sous 4 Pa	1,7 m ³ /h par m ² de surface extérieure	1,3 m ³ /h par m ² de surface extérieure	1,7 m ³ /h par m ² de surface extérieure

Les scénarios d'occupation et d'utilisation des équipements sont présentés en Annexe 2. Les charges internes, dont les valeurs maximales sont données dans le Tableau 3.7, proviennent pour l'essentiel des équipements de bureautique, de l'éclairage artificiel et des occupants. De façon générale, la densité d'occupation maximale dans la pièce de bureau est de 15 m² par occupant et de 5 m² par occupant pour la boutique. La chambre de l'appartement est quant à elle occupée par 2 personnes, de 23 h à 7 h. La chaleur sensible relâchée par chaque occupant est estimée à 105 W et nous n'avons pas intégré de périodes de vacances (notamment estivales) dans nos scénarios.

Tableau 3.7. Charges internes maximales (scénarios complets en Annexe 2)

	Bureau	Résidence	Boutique
Eclairage artificiel	18 W/m ² (pièces de bureau, salle de conférence) 12 W/m ² (couloirs)	5 W/m ²	25 W/m ²
Equipements	15 W/m ² (pièces de bureau) 10 W/m ² (salle de conférence)	3 W/m ² (chambre) 5 W/m ² (salon) 45 W/m ² (cuisine)	5 W/m ²

3.1.2.3. Prise en compte du comportement des occupants

Eclairage artificiel

Nous avons supposé que l'utilisation de l'éclairage artificiel par les occupants dépendait de la luminosité intérieure pour les pièces de référence de type bureaux et appartement. Les travaux expérimentaux d'Alessandrini et *al.* (2006) dans des bâtiments de bureaux en période d'occupation (3 bâtiments, 25 bureaux, 350 points expérimentaux) ont permis de définir une relation entre le taux d'utilisation de l'éclairage artificiel et la luminosité intérieure (Figure 3.4). En l'absence d'études portant sur le secteur résidentiel, cette relation est retenue pour modéliser l'utilisation de l'éclairage artificiel dans les pièces de référence de type bureaux et appartement.

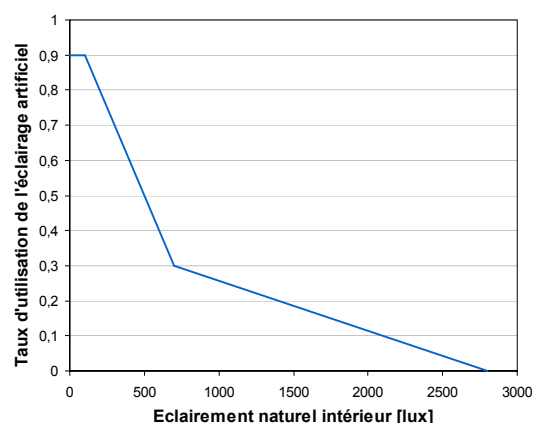


Figure 3.4. Taux d'utilisation de l'éclairage artificiel (Alessandrini et *al.*, 2006)

Dans le secteur commercial, l'éclairage artificiel étant un moyen essentiel de valorisation des produits en vente (jeux de lumière, création d'ambiances...), nous avons supposé que l'éclairage fonctionnait en continu dans la boutique de référence (de la première heure d'occupation à la dernière).

Protections solaires

La résidence et le bureau de référence sont équipés de protections solaires intérieures. Même si celles-ci permettent de protéger les occupants des apports de chaleur extérieurs en été, leur utilisation ne semble pas liée à la température intérieure ou extérieure comme l'ont montré Nicol et Humphreys (2004). Ces protections sont en premier lieu employées dans le but de limiter l'éblouissement et d'améliorer le confort visuel. Ainsi, Alessandrini et *al.* (2006) ont relié, à partir d'enquêtes *in situ* (11 bâtiments et 100 000 points expérimentaux), le taux d'utilisation des protections solaires à la luminosité extérieure (Figure 3.5).

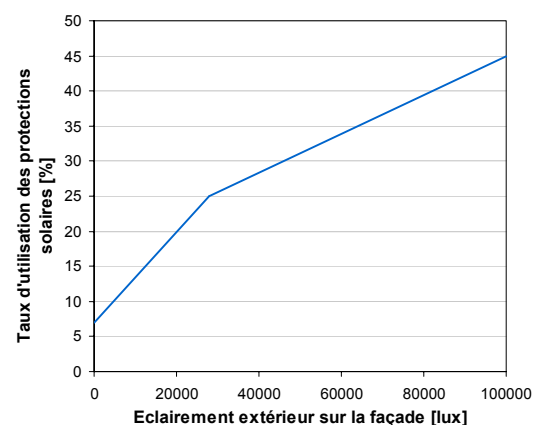


Figure 3.5. Proportion de protections solaires utilisées en fonction de la luminosité globale extérieure (Alessandrini et *al.*, 2006)

Cette relation est supposée traduire le comportement des occupants envers les protections solaires dans la suite de l'étude.

Ouvertures des fenêtres

Dans les bâtiments où la ventilation naturelle est possible en été, les occupants ouvrent les fenêtres afin d'améliorer, d'une part, la qualité de l'air intérieur et, d'autre part, leur confort thermique (abaissement de la température, création de courants d'air...).

La relation entre le taux d'ouverture des fenêtres et le climat intérieur ou extérieur a été étudiée par Nicol et Humphreys (2004) puis par Moujalled (2007). La Figure 3.6 présente, à titre d'exemple, les relations obtenues par Moujalled (2007) à partir d'enquêtes *in situ* dans des bâtiments français. Les lois obtenues sont dotées de coefficients de corrélation assez faibles, de l'ordre de 0,3 (température intérieure) et 0,4 (température extérieure) pour Moujalled (2007), et d'environ 0,28 (température intérieure et température extérieure) pour Nicol et Humphreys (2004) qui étudiaient des bâtiments européens. C'est pourquoi nous n'utiliserons pas ces lois et supposerons que les occupants ont un comportement « optimisé » en matière de confort d'été : les fenêtres sont ouvertes à partir du moment où la température extérieure est inférieure à la température intérieure et que la température intérieure est supérieure à 22 °C (les besoins de chauffage ne sont donc pas augmentés).

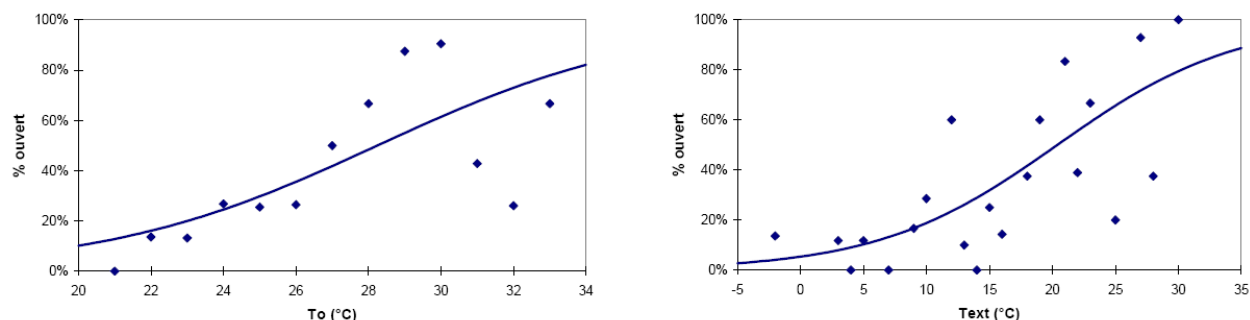


Figure 3.6. Relations entre le taux d'ouverture des fenêtres et les températures extérieures et intérieures déterminée à partir d'enquête de terrain dans des bâtiments français (Moujalled, 2007)

L'algorithme de contrôle retenu pour prendre en compte l'ouverture des fenêtres, lorsque la température extérieure est plus faible que celle intérieure, est présenté Figure 3.7. Les fenêtres ne sont utilisées qu'à la condition qu'il y ait un occupant dans la pièce.

Enfin, le taux de surface vitrée pouvant être ouverte dépend du type d'ouverture. En effet, s'il peut atteindre 100 % dans le cas d'une fenêtre à battant, il sera de l'ordre de 50 % pour une ouverture coulissante et de 30 % pour une ouverture à soufflet.

Pour la suite de l'étude, nous retenons un taux maximal d'ouverture de 30 %.

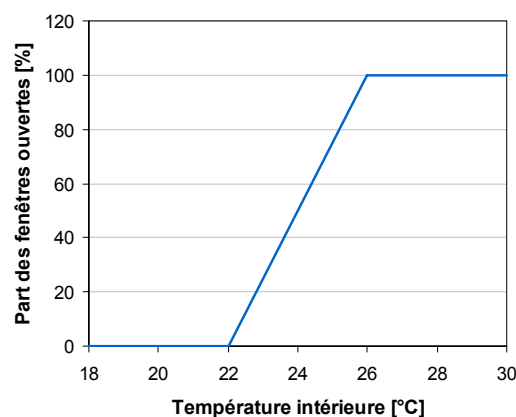


Figure 3.7. Gestion des fenêtres lorsque la température extérieure est inférieure à la température intérieure

D'autre part, des vitesses d'air trop importantes en période d'occupation peuvent être un frein à l'utilisation des fenêtres. La norme EN 15251 (CEN, 2007a) recommande par exemple que la vitesse d'air ne dépasse pas 0,82 m/s afin d'éviter certaines gênes telles que le déplacement d'objets légers. Des solutions existent pour remédier à cet éventuel problème, Allard (1998) suggère par exemple l'utilisation de fenêtres pouvant être ouvertes partiellement (plusieurs parties, système oscillo-battant). Le logiciel d'aéraulique utilisé (TRNFLOW) ne permettant pas le calcul des vitesses d'air à l'intérieur des bâtiments, une évaluation simplifiée sera réalisée pour vérifier que celles-ci ne sont pas trop élevées (partie 3.2.1.3).

Fixation des consignes de température

Les consignes sont identiques pour les trois types de bâtiment. La consigne de chauffage est de 20 °C en période d'occupation et de 15 °C en inoccupation ; celle de refroidissement est fixée à 26 °C, uniquement en période d'occupation. Ces consignes de température sont basées sur la température opérative et non sur la température de l'air qui représente moins correctement la sensation de confort thermique des occupants⁷³.

Si tous les capteurs de température ne permettent pas d'évaluer la température opérative, il est supposé que les occupants bénéficient des moyens suffisants pour adapter les consignes de température et rester dans des conditions confortables. Dans le cas de la climatisation individuelle, une manipulation très simple suffit pour adapter la puissance frigorifique de l'appareil aux besoins de confort des occupants.

⁷³ A titre d'illustration, la température de l'air peut être de 2 à 3 °C plus faible que la température opérative lors d'une journée chaude à l'intérieur de la pièce de bureau climatisée située à Nice.

3.1.2.4. Climats de référence et fichiers climatiques

Climats de référence

Les degrés jour de refroidissement et le rayonnement solaire sont les facteurs climatiques prépondérants pour évaluer la « sévérité » d'un été. Nous les avons donc calculés pour les villes représentatives des zones climatiques de la réglementation thermique 2005 en nous reposant sur une température de non refroidissement de 15 °C.

$$CDD = \sum_{i=1}^{365} \left(\frac{T_{max}^i + T_{min}^i}{2} - 15 \right)^+ \quad (3.1)$$

Avec : T_{max} et T_{min} : températures maximales et minimales journalières

Pour la suite de l'étude, nous avons choisi de considérer les climats de Trappes et de Nice qui encadrent les autres climats représentatifs. Dans le but d'étudier l'impact de la climatisation à l'échelle du territoire (chapitre 5), des valeurs de consommation pourront ainsi être estimées pour d'autres zones climatiques à partir des résultats obtenus avec ces deux climats.

En termes de ventes, nos deux climats sont représentatifs de foyers d'implantation importants de la climatisation. Ainsi, les chiffres de ventes présentés dans le Tableau 3.8 montrent que les zones « méditerranée » et « île de France » représentent respectivement de l'ordre de 30 % et 20 % des installations en France.

Tableau 3.8. Répartition des ventes de climatiseurs fixes/mobiles en 1999 (BRE, 2000)

Méditerranée	31 %
Ile de France	18 %
Sud-ouest	16 %
Nord/Centre/Ouest	13 %
Rhône Alpes	11 %
Est	11 %

Fichiers climatiques utilisés

Il existe à l'heure actuelle de nombreux types de fichiers météorologiques pouvant être employés pour le calcul des consommations d'énergie de bâtiments. Les fichiers climatiques utilisés dans cette étude sont les fichiers de format TMY2 (Typical Meteorological Year) qui sont généralement issus de mesures météorologiques menées entre 1961 et 1990 et sont constitués d'un ensemble de données horaires (rayonnement, températures...) représentatif d'une année « typique ». Dans notre cas, les données météorologiques sont celles issues des bases de données METEONORM.

Ces années, dites « typiques », sont générées à partir d'un traitement statistique des données météorologiques dont la procédure est décrite par Marion et Urban (1995). Ces fichiers excluent délibérément les étés et hivers extraordinaires (canicules par exemple) et sont donc, en premier lieu, indiqués pour prévoir des comportements moyens de bâtiment (consommations, confort) et non pour étudier le comportement de bâtiments en situation climatique extrême (dimensionnement d'appareils, étude de l'inconfort d'été en période de canicule).

Ces fichiers sont pertinents pour notre étude qui aborde la problématique du confort d'été dans un cadre général et non dans une situation particulière. Le travail de projection des consommations,

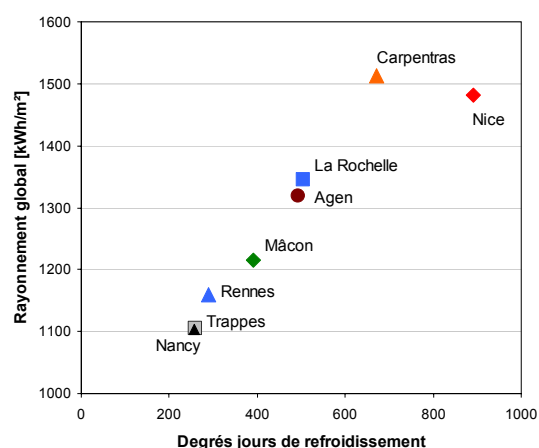


Figure 3.8. Degrés-jours de refroidissement et rayonnement solaire pour les climats représentatifs de la RT 2005

notamment, ne peut que reposer sur des années typiques. L'impact d'événements extrêmes pourra cependant être pris en compte dans l'évolution du taux de pénétration des climatiseurs individuels.

3.1.3 Sélection des actions à évaluer dans le cadre de ce chapitre

3.1.3.1. Solutions de rénovation envisageables

Il existe de nombreuses possibilités permettant de réduire l'inconfort estival et les consommations d'énergie liées au refroidissement du bâtiment. Le Tableau 3.9 présente une catégorisation des actions communément admise (Varga et al., 2007). Par la suite, nous allons réduire cette liste aux options les plus prometteuses.

Tableau 3.9. Exemples d'actions d'amélioration du confort d'été

	Actions d'amélioration envisageables
Contrôle et réduction des apports de chaleur à la surface extérieure de l'enveloppe	Installation de vitrages peu émissifs et sélectifs
	Installation de protections solaires fixes ou mobile
	Réduire les surfaces vitrées
Contrôle et réduction des transferts de chaleur à travers l'enveloppe du bâtiment	Isolation des parois (intérieure, extérieure, intégrée)
	Augmentation de l'inertie (construction de murs lourds, matériaux à changement de phase)
Réduction des apports internes	Remplacement des équipements existants (bureautique, éclairage...) par des équipements plus efficaces
	Optimiser les apports d'éclairage naturel lors de la conception du bâtiment
Systèmes à faible consommation permettant d'extraire de la chaleur du bâtiment ou d'augmenter les vitesses d'air	Utilisation de la végétation pour permettre l'évapotranspiration
	Installation d'ouvertures permettant la ventilation naturelle
	Installation d'un système d'extraction pour permettre la surventilation
	Installation d'un puits climatique
	Installation d'un système de refroidissement par évaporation
	Utilisation de ventilateurs de confort
Climatisation solaire	Installation d'une machine à absorption
	Installation de machine à adsorption

3.1.3.2. Contrôle et réduction des apports de chaleur à la surface extérieure de l'enveloppe

Vitrages à faible facteur solaire

Un vitrage se caractérise principalement par trois grandeurs : le facteur solaire, le facteur de transmission lumineuse et le coefficient de déperdition thermique.

Le facteur solaire est la proportion du flux énergétique qui traverse la vitre comparé à l'énergie reçue à l'extérieur de la paroi vitrée. Il représente la somme du rayonnement transmis et celle du rayonnement absorbé puis retransmis vers l'intérieur par le vitrage, et s'exprime en pourcentage du rayonnement reçu. Idéalement, le facteur solaire doit être élevé en hiver pour que le bâtiment puisse bénéficier des apports solaires et faible en été pour éviter les surchauffes.

Le facteur de transmission lumineuse est le pourcentage de lumière solaire transmise. Plus ce coefficient est faible, moins la lumière naturelle est exploitée, et plus la consommation d'éclairage artificiel est importante.

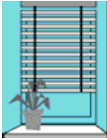




Il est possible d'adapter le facteur solaire du vitrage au climat et à la nécessité de réduire ou d'augmenter les apports solaires.

Protections solaires

L'utilisation de protections solaires permet de réduire l'éblouissement (confort visuel) et les apports solaires extérieurs (confort thermique). Une protection solaire se caractérise principalement par son facteur solaire et sa transmission lumineuse, déjà présentés pour les vitrages.

Les protections situées à l'extérieure du bâtiment sont les plus efficaces pour lutter contre l'inconfort d'été car elles empêchent une partie du rayonnement de pénétrer le vitrage. Des exemples de protections mobiles sont donnés dans le Tableau 3.10 avec des valeurs caractéristiques de facteurs solaires.

Tableau 3.10. Exemples de protections solaires mobiles et de facteurs solaires typiques (Brown, 2000)

Description		Store vénitien intérieur	Store écran intérieur	Store vénitien extérieur	Store écran extérieur	Banne
						
Facteurs solaires	Min	0,45	0,4	0,1	0,15	0,2
	Max	0,75	0,81	0,15	0,42	0,35

La mise en place de vitrages à faible facteur solaire et de protections solaires sont des actions d'amélioration du confort d'été applicables dans la majorité des bâtiments français. Nous les étudierons donc dans le présent chapitre.

3.1.3.3. Contrôle et réduction des transferts de chaleur à travers l'enveloppe du bâtiment

Isolation

En France, l'augmentation du niveau d'isolation est une mesure dont l'objectif principal est de réduire les consommations de chauffage et dont l'impact sur le confort d'été peut être positif ou négatif selon les types de bâtiments et les climats. C'est pourquoi, nous avons choisi de ne pas considérer cette solution comme une action d'amélioration du confort d'été, mais comme une tendance inéluctable, dont l'impact sur le confort d'été doit être étudié.

Inertie

L'inertie du bâtiment permet de stocker temporairement la chaleur en journée, réduisant ainsi l'élévation de température le jour et l'augmentant la nuit. Lorsque cette chaleur peut être évacuée la nuit, grâce à la ventilation naturelle par exemple, une inertie importante permet alors de réduire les besoins de refroidissement et l'inconfort d'été.

Cependant, les moyens d'augmenter l'inertie en rénovation sont très limités. Il s'agit essentiellement de profiter au maximum de l'inertie existante en évitant par exemple les faux-plafonds ou les revêtements inutiles. Les matériaux à changement de phase pourraient être une solution mais, comme l'indique Varga et al. (2007), leur marché est encore instable et leur impact environnemental en termes de cycle de vie ne fait pas consensus. Dans la suite de l'étude, nous n'étudierons donc pas l'augmentation de l'inertie des bâtiments.

3.1.3.4. Réduction des apports internes

Dans le secteur tertiaire, une étude réalisée par Sidler (2002) sur des bâtiments de bureaux existants montrait que 40 % de la charge de climatisation s'expliquait par les apports internes. La réduction des apports internes présente alors le double avantage de diminuer à la fois la consommation liée à l'usage direct d'appareils électriques et de réduire l'inconfort et les besoins de refroidissement. Si les appareils

électroménagers et les systèmes de cuisson peuvent dans certains cas représenter des sources importantes d'apports de chaleur dans les bâtiments résidentiels, les apports internes y sont généralement plus faibles.

La réduction des apports internes sera étudiée par la suite, leur prise en compte devra tenir compte de la réduction des consommations directes, de la diminution de la climatisation et de l'augmentation du chauffage.

3.1.3.5. Systèmes à faible consommation permettant d'extraire de la chaleur du bâtiment ou d'augmenter les vitesses d'air

Seuls les systèmes de ventilation naturelle et mécanique seront étudiés par la suite, les autres systèmes (puits climatique, toit végétal...) présentent, selon nous, un potentiel d'utilisation limité dans les bâtiments existants.

Ventilation naturelle

La ventilation naturelle consiste à faire entrer, par des fenêtres ou des ouvrants spécifiques, de l'air extérieur à l'intérieur du bâtiment lorsque la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur permet le rafraîchissement de ce dernier.

Si la ventilation naturelle est généralement contrôlée automatiquement dans les bâtiments climatisés, celle-ci est en premier lieu contrôlée par les occupants dans les bâtiments non climatisés. Il reste cependant possible d'ajouter des ouvrants spécifiques pour permettre une ventilation mieux optimisée ou de mettre en place un système de ventilation nocturne.

On différencie habituellement la ventilation mono-façade de la ventilation traversante. Dans le premier cas, la différence de température entre l'extérieur et l'intérieur est le moteur principal de la ventilation et les taux de renouvellement d'air sont généralement faibles. Grâce au vent et aux différences de pression, la ventilation traversante permet quant à elle d'obtenir des débits plus élevés.

Ventilation mécanique

La sur-ventilation mécanique consiste à refroidir un bâtiment en introduisant de l'air extérieur lorsque celui-ci présente une température inférieure à la température intérieure ; l'utilisation de ventilateurs permettant alors de garantir un taux minimum de renouvellement d'air quelles que soient les conditions extérieures. Le potentiel de telles solutions dépend des températures extérieure et intérieure, de l'inertie du bâtiment, des caractéristiques du ventilateur, de l'environnement du bâtiment...

La sur-ventilation mécanique peut être obtenue en installant un système d'extraction d'air ou en utilisant le système existant, dimensionné à des fins hygiéniques. Des simulations, effectuées pour des immeubles de bureaux (Grignon-Massé et *al.*, 2009), ont montré que les résultats obtenus en termes d'économies d'énergie étaient très limités et très dépendants de l'efficacité du système de ventilation et des pertes de charge : selon les caractéristiques du système de ventilation existant, les conclusions changent radicalement, de la surconsommation d'énergie à la réalisation d'économies d'énergie. Etant donné les incertitudes importantes sur ces données (les connaissances sur les pertes de charge des systèmes existants sont rares) et le potentiel limité de cette solution, il nous a semblé pertinent de ne pas aborder la sur-ventilation mécanique effectuée par un système existant.

Au contraire, nous étudierons les systèmes spécifiques de sur-ventilation qui sont supposés dimensionnés dans ce but et mis en place lorsque les pertes de charges peuvent être faibles.

Ventilateurs de confort

L'efficacité énergétique des ventilateurs de confort a été étudiée en marge de cette thèse. Une analyse de ces produits ainsi qu'un travail de caractérisation de leur usage en Europe et de leur potentiel d'amélioration ont notamment été menés (Adnot et *al.* (2009), Grignon-Massé et *al.* (2006), Rivière et *al.* (2009)).

L'étude de l'efficacité énergétique des ventilateurs de confort reposait sur le choix du débit d'air comme unité fonctionnelle, une approche qui s'avère ici insuffisante. Le confort dépendant des vitesses d'air au voisinage du corps, il aurait fallu étudier les profils de vitesse créés par ces appareils

dans des pièces de référence, ce qui n'a pu être réalisé en détail. De plus, comme discuté au chapitre 2, l'utilisation de ce type d'appareils est probablement incluse dans les zones de confort adaptatives et donc déjà prise en compte dans notre évaluation du confort.

Les systèmes d'amélioration du confort d'été par augmentation des vitesses d'air au voisinage des occupants (ventilateurs de bureaux, ventilateurs de plafond...) ne seront donc pas étudiés par la suite.

3.1.3.6. Climatisation solaire

Concernant les systèmes de climatisation solaire, il n'existe pas aujourd'hui d'offres clé-en-main sur le marché ou alors à des coûts très élevés. Lors de cette thèse, nous n'avons pas eu la possibilité d'étudier leur potentiel de développement et ils ne sont donc pas retenus pour la suite. Cependant, même dans le cas d'un développement de ces solutions dans les années à venir, elles formeront un marché correspondant plutôt à des utilisations de climatisations centralisées, et leur impact sur la pénétration de la climatisation individuelle devrait rester limité.

3.1.3.7. Portfolio de solutions de rénovation étudiées

Au final, nous avons choisi de nous concentrer sur les solutions suivantes :

- vitrages performants,
- protections solaires,
- réduction des apports internes : équipements et éclairage,
- ventilation naturelle (diurne/nocturne),
- sur-ventilation mécanique.

3.2 Etude du potentiel d'actions portant sur l'enveloppe et l'usage du bâtiment en termes de réduction des besoins de refroidissement et d'amélioration du confort estival

3.2.1 Etude des besoins d'énergie et du confort estival dans les pièces de référence

3.2.1.1. Evaluation des besoins de refroidissement et de chauffage

Les besoins de chauffage et de refroidissement des pièces de référence obtenus par simulation sont donnés par m² de surface traitée (climatisée et chauffée) dans le Tableau 3.11.

Tableau 3.11. Besoins de chauffage et de refroidissement des cas de référence pour les différents climats

		Besoins de la pièce étudiée [kWh/m ²]	
		Chauffage	Refroidissement
Bureau	Trappes	30,1	74,4
	Nice	3	163,2
Appartement	Trappes	55,1	11
	Nice	13,8	31,3
Boutique	Trappes	70,6	52,9
	Nice	19,6	111,3

De façon générale, les besoins de chauffage sont plus élevés dans les boutiques, devant les appartements et les bureaux, alors que les besoins de refroidissement sont plus accentués dans les bureaux, devant les boutiques et les appartements. Ces écarts s'expliquent par les différences importantes qui existent en termes de surfaces vitrées, de gains internes et d'infiltrations d'air (Tableau 3.12). Concernant le confort d'été, des charges internes élevées et des surfaces vitrées importantes favorisent l'augmentation des besoins de refroidissement dans les bureaux et la boutique par rapport à l'appartement. Cependant, le taux de renouvellement d'air élevé de la boutique contribue quant à lui à une diminution des besoins de refroidissement (free cooling).

Tableau 3.12. Comparaison des pièces de référence selon trois paramètres

	Charges internes	Surface vitrée orientée sud ou ouest	Renouvellement d'air
Pièce de bureaux	Elevées	Moyenne	Faible
Boutique	Elevées	Elevée	Elevé ⁷⁴
Chambre	Faibles	Moyenne	Faible

Courbes de charge

Les courbes de charge de la boutique et de l'appartement à Trappes sont présentées respectivement sur les Figure 3.9 et Figure 3.10. Malgré une dispersion des points importante, une corrélation linéaire entre les besoins de refroidissement et la température extérieure apparaît dans les deux cas. De l'ordre de 8 °C pour le bureau et de 13 °C pour l'appartement, la température de non refroidissement est très faible. De plus, sur les 1423 heures de rafraîchissement dans le bureau de Trappes, la température extérieure n'est supérieure à 25 °C que pendant 51 heures. Le même phénomène se retrouve dans le bureau situé à Nice où les heures de refroidissement correspondant à des températures extérieures supérieures à 25 °C se comptent au nombre de 305 sur un total de 2539.

⁷⁴ Pour intégrer l'ouverture fréquente de la porte d'entrée (3 m²), nous avons supposé dans nos simulations que celle-ci était ouverte sur 15 % de sa surface pendant les heures d'occupation.

Ces observations traduisent le fait qu'il n'y a pas de gestion des ouvertures pour introduire de l'air extérieur (plus frais) à l'intérieur des locaux climatisés et que la ventilation à des fins hygiéniques ne suffit pas à refroidir significativement un bâtiment. Dans le cas des boutiques et des bureaux, ces besoins de refroidissement à faibles températures s'expliquent aussi par la quantité importante de chaleur dégagée par l'éclairage et les équipements de bureautique.

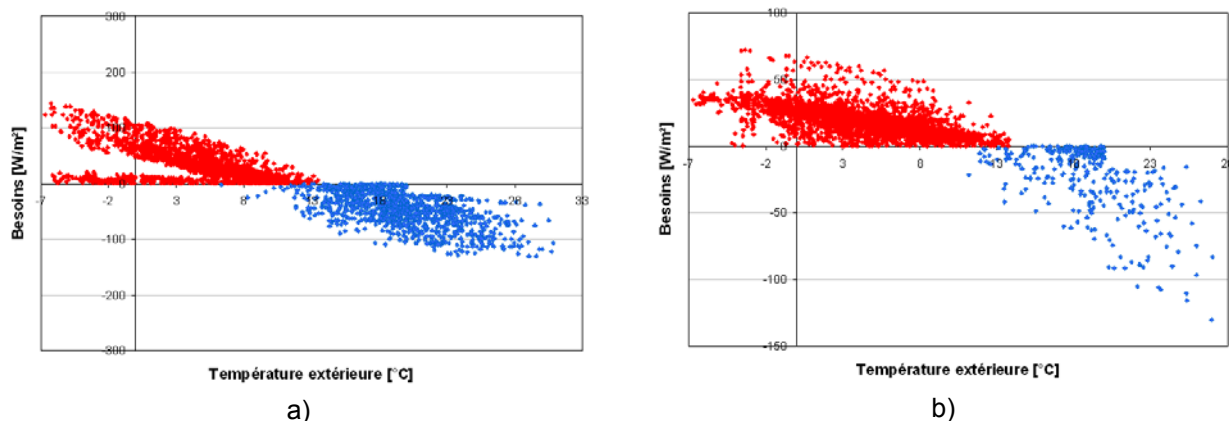


Figure 3.9. Courbes de charge pour le bureau (a) et l'appartement (b) situés à Trappes

La Figure 3.10 présente les besoins pour le bureau à Nice, dans le cas où toutes les heures sont prises en compte (a) et dans le cas où la première heure d'occupation du lundi est exclue (b). Les relances de climatisation apparaissent clairement sur la Figure 3.10a), elles sont nécessaires pour atteindre la consigne de température après des périodes de week-end pendant lesquelles aucune stratégie de lutte contre l'inconfort d'été n'est mise en place. Un dimensionnement de systèmes de climatisation permettant de satisfaire ces besoins de relance impliquerait un surdimensionnement d'un facteur 2 pour le reste du temps de fonctionnement. En raison du réduit de température, ce phénomène de relance est nettement moins marqué en période de chauffage.

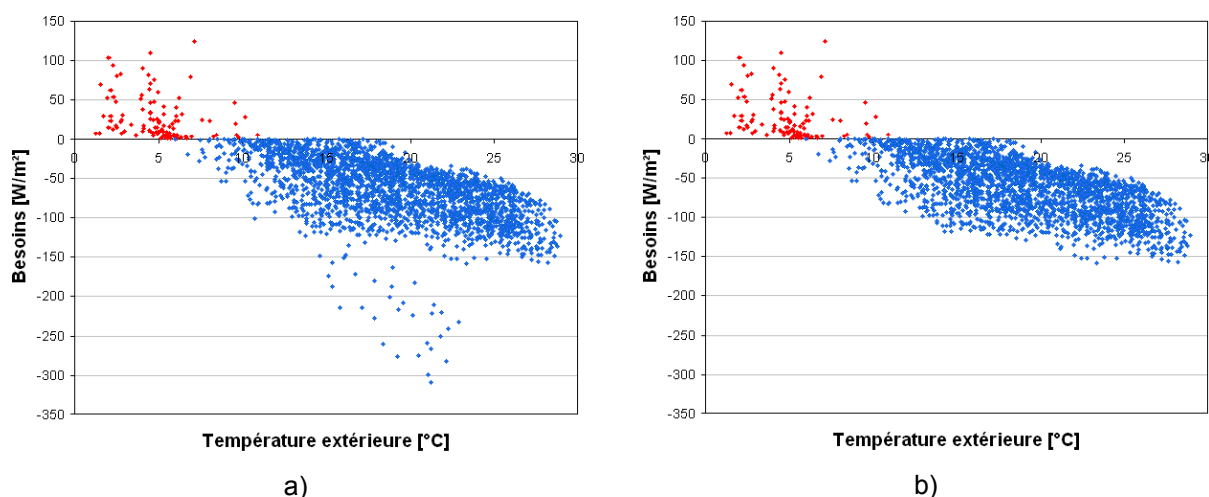


Figure 3.10. Courbe de charge pour le bureau à Nice en considérant toutes les heures d'occupation (a) en enlevant la première heure d'occupation le lundi (b)

3.2.1.2. Influence de la consigne sur les besoins de climatisation

La consigne de température que nous avons retenue pour les cas de référence permet un confort total⁷⁵ tout en minimisant les consommations d'énergie (toutes choses égales par ailleurs). Elle correspond aussi à la valeur limite recommandée⁷⁶ par la loi française (RF, 2007) qui stipule que dans les locaux

⁷⁵ Il n'y a pas d'inconfort selon les normes étudiées au chapitre 2.

⁷⁶ A l'heure actuelle, il n'y a pas de sanction prévue en cas de non-application.

dans lesquels est installé un système de refroidissement, celui-ci ne doit être mis ou maintenu en fonctionnement que lorsque la température intérieure des locaux dépasse 26 °C⁷⁷.

La réalité est cependant généralement différente sur le terrain⁷⁸. Les Figure 3.11a) et b) présentent l'impact du choix de la consigne de température sur les besoins de climatisation des bureaux et des appartements. Dans les bureaux, les besoins s'élèvent d'environ 10 à 15 % lorsque la consigne diminue de 1 °C ; dans le cas des appartements, cette augmentation est de l'ordre de 40 à 50 %. Aussi, même si elle ne sera pas étudiée par la suite, l'augmentation des températures de consigne, pouvant être obtenue en veillant à l'application du décret ou par des campagnes de sensibilisation, permet des économies d'énergie substantielles.

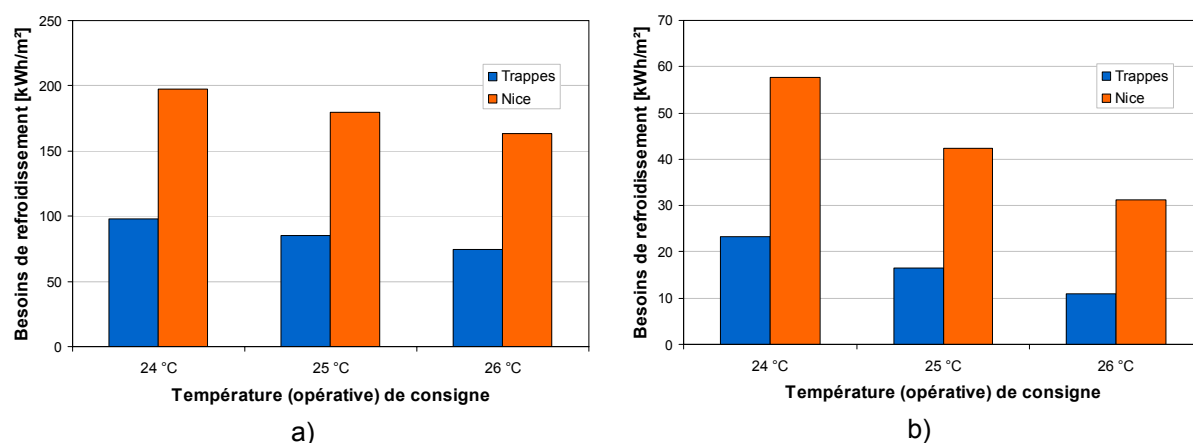


Figure 3.11. Impact de la consigne sur les besoins de refroidissement du bureau (a) et de l'appartement (b)

3.2.1.3. Evaluation du confort thermique à l'intérieur des pièces de référence

Comme nous l'avons indiqué dans la partie 3.1.1, les bâtiments de référence ont été simulés en évolution libre, sans équipement de climatisation. Les résultats obtenus en termes d'inconfort sont regroupés dans le Tableau 3.13 où ils sont exprimés en heures d'occupation inconfortables, en pourcentage d'heures inconfortables par rapport aux heures d'occupation et en degrés-heures d'inconfort. Ces différents indices ont été calculés, d'une part sur la base de la zone de confort adaptative (voir chapitre 2), et d'autre part sur la base de la zone de confort analytique (température maximale autorisée de 26 °C). Dans le cas de la boutique, où les moyens d'adaptation sont pratiquement inexistant, seule la seconde zone de confort peut être utilisée.

Tableau 3.13. Inconfort dans les pièces de référence non climatisées

		Inconfort par rapport à la zone adaptative			Inconfort par rapport à Top = 26 °C		
		[h]	%	[°C.h]	[h]	%	[°C.h]
Bureau	Trappes	370	10	617,6	528	14	1170,6
	Nice	893	24,4	1778,7	1308	35,8	4596,3
Appartement	Trappes	252	8	695,05	392	12	932,8
	Nice	660	20	1371,2	987	30	3869
Boutique	Trappes	-	-	-	1072	27	4479,6
	Nice	-	-	-	2041	51	12181

⁷⁷ Il n'est pas précisément mentionné s'il s'agit de la température de l'air ou de la température opérative mais l'utilisation de cette dernière paraît plus vraisemblable dans une approche d'évaluation du confort.

⁷⁸ A titre d'exemple, les enquêtes de terrain menées par Moujalled (2007) et présentées Figure 3.12 et Figure 3.13 montrent que les consignes des trois bâtiments climatisés étudiés sont de l'ordre de 22, 25 et 28 °C.

L'inconfort estival régnant dans les pièces de référence est important ; de l'ordre de 10 à 25 % des heures d'occupation sont inconfortables dans les appartements et les bureaux, environ 30 à 50 % le sont dans le cas des boutiques. Ceci est lié à des situations défavorables (orientation sud-ouest, positionnement sous la toiture) et à une protection contre l'inconfort estival quasiment inexistante. Ces cas de référence doivent être considérés comme un point de départ pour l'étude d'améliorations et non comme représentatifs de l'ensemble du parc français.

Nos résultats sont cependant en accord avec l'étude menée par Feldmann et Schwarzberg (2009) à partir de simulations en ventilation naturelle d'un bâtiment collectif non rénové (Tableau 3.14). Selon cette étude, la période d'inconfort dans les logements situés au dernier étage du bâtiment est de l'ordre de 7 % du temps d'occupation à Trappes et de 50 % à Nice, contre respectivement 12 et 30 % selon nos résultats.

Tableau 3.14. Fréquence relative (% du temps d'occupation) d'apparition d'une température opérative de plus de 26 °C dans un bâtiment collectif non rénové (résultats obtenus par simulations) (Feldmann et Schwarzberg, 2009)

	Trappes	Agen	Nice
RDC pignon	1,6 %	8 %	29 %
RDC milieu de façade	1,6 %	8 %	31 %
Dernier étage pignon	6,9 %	26 %	48 %
Dernier étage milieu de façade	7,1 %	28 %	50 %

Si l'inconfort de nos pièces de référence peut paraître élevé, des enquêtes menées dans 8 bâtiments de bureaux situés à Lyon ou à proximité (Moujalled, 2007) ont montré que la réalité n'était pas si éloignée de nos résultats. La Figure 3.12 agrège les résultats de cette étude et révèle que deux des cinq bâtiments non climatisés ont des températures moyennes supérieures à 30 °C. De plus, la Figure 3.14, qui présente les fréquences d'occurrence des températures cumulées par catégorie de bâtiment, indique que la température opérative dans les bâtiments ventilés naturellement en été est supérieure à 26 °C pendant plus de 50 % du temps d'occupation. Le constat tiré de ces enquêtes de terrain en matière de confort est donc pire que nos résultats qui prédisaient des périodes d'inconfort de l'ordre de 15 à 40 % du temps d'occupation dans les bureaux (Tableau 3.13). Si nos pièces de référence ne sont pas représentatives de l'ensemble du parc français, elles semblent correspondre, de façon correcte, à la part du parc susceptible de devenir climatisée.

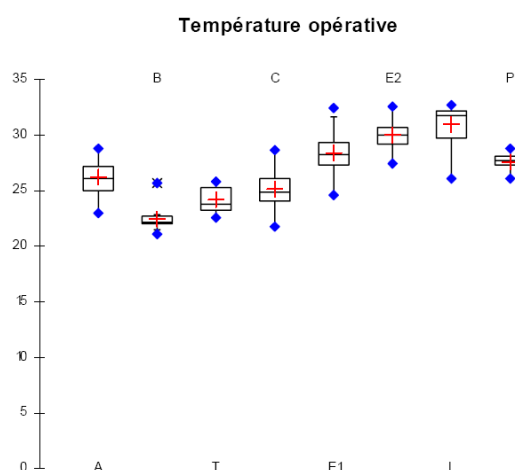


Figure 3.12. Températures opératives rencontrées en été (les rectangles représentent la médiane et les premier et troisième quartiles, la croix rouge est la moyenne, les points bleus sont les minimum et maximum), les bâtiments A, B et T sont climatisés (Moujalled, 2007).

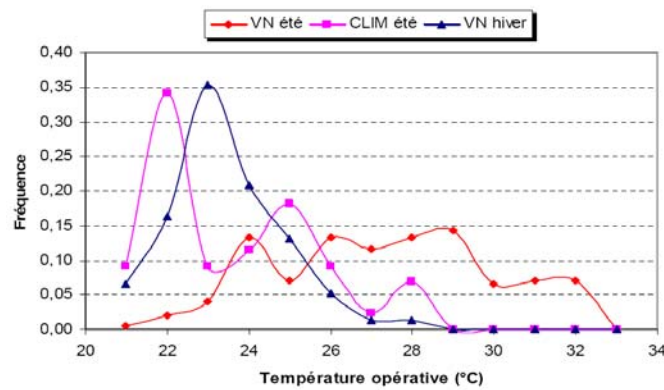


Figure 3.13. Fréquence d'occurrence des températures opératives intérieures – Résultats d'enquêtes de terrain (Moujalled, 2007)

Vitesses d'air

Comme le montre la Figure 3.14, le taux de renouvellement d'air lié à l'usage des ouvertures des fenêtres peut atteindre 12 volumes/heure dans les bureaux. Cette valeur peut paraître élevée mais correspond en fait à des vitesses d'air acceptables.

En effet, selon Graça (2003), qui a développé des modèles⁷⁹ de prédiction des vitesses d'air dans les pièces où la ventilation est traversante, la vitesse maximale peut s'écrire comme indiqué par l'équation (3.2).

$$v_{max} = \frac{q_{in}}{A_{inlet} \cdot C_d} \quad (3.2)$$

Avec : q_{in} le débit entrant (m^3/s), A_{inlet} la surface d'entrée et C_d , le coefficient de décharge égal à 0,611.

Dans notre cas, la surface la plus faible est celle de la porte ($6 m^2$) et c'est donc ici que nous rencontrerons les vitesses les plus élevées. L'utilisation de l'équation (3.2) aboutit pour 12 volumes/heure à une vitesse de 0,22 m/s, valeur inférieure au 0,8 m/s généralement considéré comme gênant pour une activité de bureau. Nous avons vérifié que les vitesses d'air rencontrées dans les autres pièces de référence étaient acceptables.

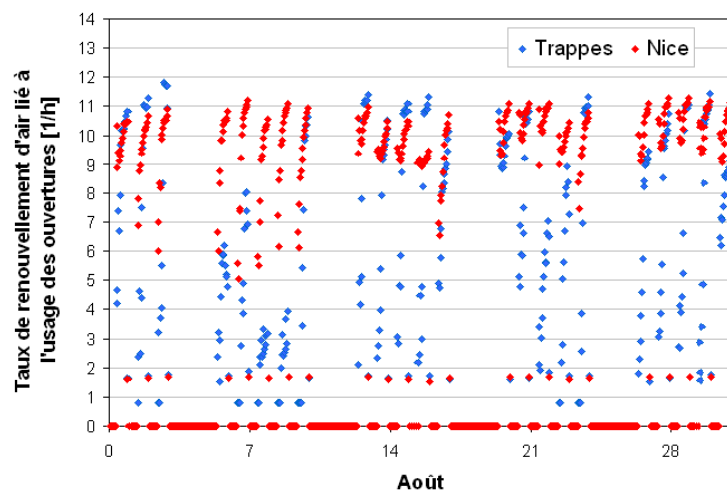


Figure 3.14. Taux de renouvellement d'air lié à l'usage des fenêtres dans la pièce de bureaux non climatisée en période d'occupation.

⁷⁹ Basés sur de la CFD et des corrélations expérimentales.

3.2.2 Spécification technique des actions étudiées dans le secteur tertiaire

3.2.2.1. Mise en place de vitrages performants

Cette action consiste à remplacer les parois vitrées par un vitrage plus performant (actuellement disponible sur le marché) possédant les caractéristiques suivantes :

- facteur solaire : 0,298 (référence : 0,78)
- facteur de transmission visible : 0,383 (référence : 0,82)
- coefficient U : 1,3 W/m²/K (référence : 3 W/m²/K)

Compte tenu de ces propriétés, ce vitrage permettra à la fois de réduire les besoins de refroidissement et ceux de chauffage, mais sera à l'origine d'une augmentation des consommations d'éclairage.

3.2.2.2. Installation de protections solaires

L'impact des protections solaires sur le confort d'été dépend principalement de trois facteurs que sont la position de la protection (interne/externe), le contrôle de la protection et le facteur solaire de cette dernière.

Dans cette étude, le bureau de référence est muni de protections solaires intérieures contrôlées par les occupants alors que la boutique n'est équipée d'aucun mécanisme de cette sorte. Par la suite, nous étudierons l'impact de protections solaires extérieures qui empêchent une partie du rayonnement de pénétrer le vitrage et sont donc plus efficaces que les protections intérieures pour lutter contre l'inconfort d'été. A titre d'exemple, les protections solaires intérieures qui équipent les pièces de bureaux de référence ne permettent que de faibles gains par rapport à une situation sans protection : de l'ordre de 2 % en besoin de refroidissement et de 6 % en degrés-heures d'inconfort.

En ce qui concerne le facteur solaire, la valeur de 0,3, conseillée par Filfli et *al.* (2006), est retenue, elle correspond généralement aux caractéristiques d'un store de type écran.

Deux types de gestion des protections solaires seront étudiés : le contrôle en fonction de la luminosité déjà présenté en partie 3.1.2.3 et un contrôle des protections en fonction du rayonnement. Ce dernier consiste à abaisser les protections lorsque le rayonnement dépasse 150 W/m² et que la température intérieure est supérieure à 22 °C. Il est aujourd'hui utilisé pour gérer automatiquement les protections solaires dans certains bâtiments (Standaert, 2005). Aucune information n'ayant été trouvée sur les puissances électriques absorbées par les moteurs permettant de contrôler les protections solaires, ce poste de consommation sera négligé par la suite.

Les actions d'amélioration retenues pour la suite de l'étude consistent donc à installer des protections solaires extérieures ayant les caractéristiques présentées dans le Tableau 3.15, les différents contrôles ayant été définis précédemment.

Tableau 3.15. Actions retenues concernant les protections solaires

Types de bâtiment	Type de protection solaire	Contrôle
Bureau	Ecran (FS=0,3)	Luminosité
		Rayonnement
Boutique	Banne (FS=0,3)	Rayonnement

3.2.2.3. Recours à la ventilation naturelle

L'impact de la ventilation naturelle sur le confort d'été dépend principalement de deux facteurs que sont le contrôle des ouvertures et la surface des ouvrants. Dans la suite de l'étude, nous supposerons que la surface des ouvrants est égale à 30 % de la surface vitrée du bâtiment, ce qui correspond à des ouvertures à soufflet. Concernant la régulation des ouvertures, celle-ci est différente selon que le bâtiment est, ou non, climatisé.

Bâtiments climatisés

Dans les bâtiments climatisés, une utilisation optimale de la ventilation naturelle nécessite de mettre en place des stratégies de régulation des ouvertures. Plusieurs études, (Martin et Fletcher, 1996) (Van Paasen *et al.*, 1998) (Kolokotroni et Aronis, 1999), ont montré qu'il n'y avait que de très faibles différences de résultats entre des algorithmes de contrôle de complexités hétérogènes. Une attention particulière doit surtout être portée à l'évitement d'un refroidissement trop important. L'algorithme de gestion des ouvertures consiste à ouvrir l'intégralité de ces dernières lorsque la température intérieure est supérieure à 22 °C et que la température extérieure dépasse 12 °C. Il a été vérifié que cet algorithme n'impliquait pas d'augmentation des consommations de chauffage ou d'inconfort due à des températures trop faibles.

Dans certaines configurations, la ventilation diurne n'est pas adaptée (zones bruyantes par exemple) et nous effectuerons donc une différenciation entre une action permettant la ventilation naturelle à tout moment et une action qui autorise uniquement la ventilation nocturne.

Bâtiments non climatisés

Dans le cas des bâtiments non climatisés, l'hypothèse de contrôle des ouvertures par les occupants a été présentée en partie 3.1.2.3. Il est possible d'augmenter le potentiel de la ventilation naturelle en autorisant la ventilation nocturne avec l'algorithme de contrôle décrit pour les bâtiments climatisés. Cette action est retenue pour la suite de l'étude.

3.2.2.4. Installation d'un système de sur-ventilation mécanique nocturne

L'efficacité de la ventilation mécanique en termes d'amélioration du confort d'été dépend principalement de trois facteurs que sont, le contrôle du système, le débit des ventilateurs d'extraction et leur efficacité énergétique. Le taux de renouvellement d'air est fixé à 6 volumes/heure et l'algorithme de contrôle utilisé pour la ventilation naturelle nocturne dans les bâtiments climatisés est retenu (partie 3.2.2.3). Il est cependant nécessaire que la différence de température intérieure/extérieure soit supérieure à 2 °C pour que l'efficacité du refroidissement justifie l'énergie consommée par les ventilateurs.

Prise en compte de la consommation des ventilateurs

Nous avons supposé que le rendement du système (moteur-ventilateur) était de 0,7, ce qui correspondait en 2002 à une technologie dans la moyenne supérieure du marché (Bolher *et al.*, 2002). La puissance électrique absorbée par les ventilateurs a été calculée selon l'équation (3.3).

$$P_{el} = \frac{\dot{V} \cdot \Delta P}{\eta} \quad (3.3)$$

Avec : P_{el} la puissance électrique consommée, \dot{V} le débit d'air [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$], ΔP les pertes de charge [Pa] et η le rendement du ventilateur et du moteur.

Les pertes de charge peuvent varier considérablement selon les bâtiments. Les enquêtes commanditées par l'AIE (1995) notaient par exemple que celles-ci pouvaient s'élever de 50 à 2000 Pa pour un système centralisé. Des valeurs typiques (hautes, moyennes et basses) de pertes de charge sont fournies pour plusieurs composants dans la norme EN 13 779 (CEN, 2007b). Les valeurs moyennes sont retenues pour le bureau, les valeurs basses pour la boutique, ce qui aboutit aux pertes de charge données dans le Tableau 3.16. Les pertes de charge dépendent du débit d'air circulant dans les gaines mais nous supposons que le système est dimensionné pour le débit maximal de sur-ventilation. Les pertes de charge retenues correspondent donc à celles du système au débit maximal de sur-ventilation.

Tableau 3.16. Pertes de charge retenues pour l'étude de la sur-ventilation mécanique

Composants	Bureau	Boutique
Gaines d'extraction d'air	200	100
Récupérateur de chaleur, Filtres d'air, Silencieux	-	-
Bouches d'arrivée d'air et de sortie d'air	50	20
Total [Pa]	250	120

3.2.2.5. Etude de solutions de réduction des apports internes

Réduction des apports internes liés à l'éclairage dans les bureaux et boutiques

La puissance d'éclairage installée dépend de nombreux paramètres : le niveau d'éclairement, l'efficacité lumineuse des sources lumineuses en lumens/watt, le rendement optique du luminaire qui permet la répartition de la lumière dans l'espace, le niveau de clarté des revêtements intérieurs, la géométrie des pièces et la disposition des luminaires.

Dans les espaces de bureaux, l'éclairage doit respecter les niveaux de contraintes liés au travail des occupants. D'un point de vue normatif, l'éclairement moyen préconisé est de 500 lux pour les bureaux (AFNOR, 1990) et de 300 lux pour le travail sur écran de visualisation (AFNOR, 1987). Plusieurs travaux (Filfli et *al.*, 2006), (Marchio, 2008), (Sidler, 2005) s'accordent pour dire qu'il est possible d'atteindre ce niveau de confort visuel avec une puissance installée de l'ordre de 10 W/m², notamment en utilisant des tubes fluorescents, des luminaires performants ainsi que des ballasts électroniques. Dans les boutiques cependant, la mise en valeur des produits, la création d'ambiance nécessite des systèmes plus puissants. **Il est supposé que la puissance d'éclairage installée peut être réduite à 10 W/m² dans les bureaux et à 12 W/m² dans la boutique, ceci sans dégrader les conditions de confort intérieur.**

Réduction des apports internes liés à la bureautique dans les bureaux

Un ordinateur de bureau est composé d'un écran et d'une unité centrale. L'enquête de Sidler (2005) qui a porté sur 49 ensembles de bureaux de la région PACA a permis d'établir des valeurs moyennes de puissance électrique des postes de travail. La puissance moyenne d'une unité centrale est de 47 W mais il existe un rapport de 1 à 4 au sein de l'échantillon. Concernant les écrans, cela dépend du type d'écran (principalement : cathodiques ou à cristaux liquides (LCD)) et de sa taille (Tableau 3.17).

Tableau 3.17. Puissance consommée par différents écrans (Sidler, 2005)

	15" LCD	17" LCD	15" cathod.	17" cathod.	19" cathod.	21" cathod.
Puissance en marche [W]	21	34	54	61	86	102

Pour la situation de référence, il a été supposé que chaque occupant (12 m²) était équipé d'un poste de travail composé d'une unité centrale et d'un écran plat 17" (34 W). Il est de plus considéré qu'une imprimante laser (267 W, valeur moyenne selon l'enquête menée par Sidler (2005)) est partagée par trois occupants.

A titre d'exemple, un ordinateur portable ne consomme que 25 W et le remplacement des postes de travail par ce type d'ordinateur aboutit à une densité d'environ 10 W/m² dans notre cas de référence. L'utilisation d'une imprimante deux fois plus efficace permet d'atteindre 6 W/m².

L'évolution des besoins de refroidissement sont présentés Figure 3.15 pour ces trois niveaux d'apport. Des réductions de l'ordre de 15 – 20 % peuvent être atteintes dans le meilleur des cas.

Cependant, une réduction significative des besoins de refroidissement *via* l'utilisation d'appareils de bureautique économes s'effectue généralement en contrepartie d'une détérioration importante du service rendu (vitesse de calcul, ergonomie, confort...) qui n'est pas toujours acceptable dans les entreprises. Nous avons donc choisi de ne pas étudier cette action par la suite

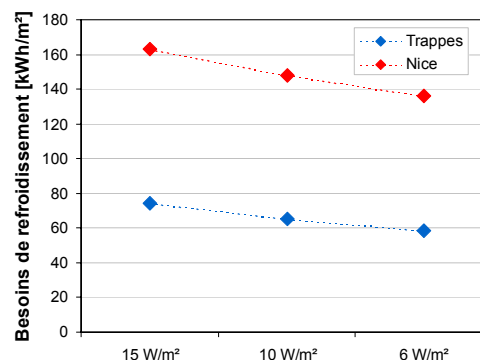


Figure 3.15. Influence des apports internes liés à la bureautique sur les besoins de refroidissement des pièces de bureau

3.2.2.6. Portfolio d'actions

Le champ du travail a été réduit en sélectionnant certaines actions et en les caractérisant de façon détaillée. Les Tableau 3.18 et Tableau 3.19 regroupent l'ensemble des actions étudiées pour les bâtiments de bureaux et la boutique.

Tableau 3.18. Actions retenues pour la pièce de bureaux

Actions	Acronyme	Description
Mise en place de protections solaires	PS (lux)	Facteur solaire de 0,3 – Contrôle en fonction de la luminosité
	PS (ray)	Facteur solaire de 0,3 – Contrôle en fonction du rayonnement
Remplacement du système d'éclairage	E	Puissance installée de 10 W/m ²
Installation de vitrages à faible facteur solaire	V	Facteur solaire de 0,298 – Transmission visible 0,383 U=1,3 W/m ² /K
Ventilation naturelle nocturne	VN (N)	Ouverture de 30 % de la surface vitrée en fonction de l'algorithme déjà présenté
Ventilation naturelle diurne/nocturne	VN (D/N)	Ouverture de 30 % de la surface vitrée en fonction de l'algorithme déjà présenté
Ventilation mécanique nocturne	VM	Débit de 6 ACH – Algorithme de contrôle déjà présenté

Tableau 3.19. Actions retenues pour la boutique

Actions	Acronyme	Description
Mise en place d'une banne	PS	Facteur solaire de 0,3 – Contrôle en fonction du rayonnement
Remplacement du système d'éclairage	E	Puissance installée de 12 W/m ²
Installation de vitrages à faible facteur solaire	V	Facteur solaire de 0,298 – Transmission visible 0,383 U=1,3 W/m ² /K
Ventilation mécanique nocturne	VM	Débit de 6 ACH – Algorithme de contrôle déjà présenté

3.2.3 Potentiel d'amélioration du confort d'été dans le secteur tertiaire

3.2.3.1. Ensembles d'actions simulés

Toutes les actions regroupées dans les Tableau 3.18 et Tableau 3.19 ont été simulées individuellement et conjointement. Si toutes les combinaisons possibles ont été étudiées, nous ne reprenons ici qu'une partie des résultats, et ce par souci de lisibilité. Nous nous concentrerons sur les besoins de refroidissement et l'inconfort estival associés à toutes les actions individuelles, ainsi qu'aux ensembles d'actions présentés dans le Tableau 3.20. Pour la détermination de ces ensembles d'action, nous avons donné la priorité à la réduction des apports internes, puis à la réduction des apports extérieurs, et enfin aux stratégies de ventilation.

Tableau 3.20. Description des ensembles d'actions présentés par la suite

Bâtiments de bureaux	
Pack 1	E + PS (ray)
Pack 2	E + V
Pack 3	E + PS +V
Pack 4	E + PS +V + VN (N)
Pack 5	E + PS +V + VN (D/N)
Pack 6	E + PS +V + VM
Boutique	
Pack 1	E + PS (ray)
Pack 2	E + V
Pack 3	E + PS +V
Pack 4	E + PS +V + VM

3.2.3.2. Evaluation des différentes actions pour la pièce de bureaux

Evaluation des actions individuelles

Les besoins de refroidissement et l'inconfort estival sont présentés pour les actions individuelles sur les Figure 3.16a) et Figure 3.16b).

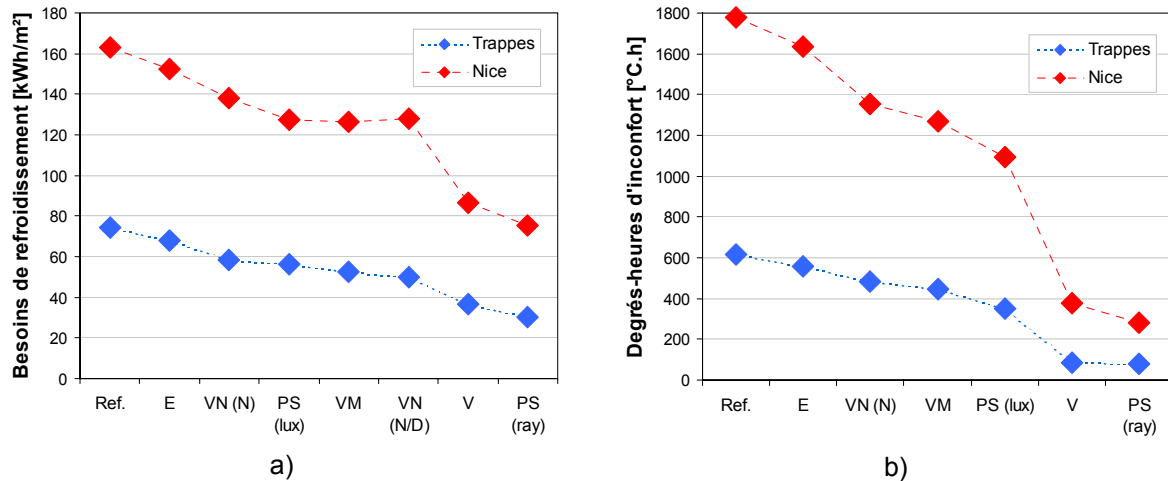


Figure 3.16. Impact des actions prises individuellement sur les besoins (a) et l'inconfort (b)

■ Protections solaires

La meilleure action individuelle consiste à mettre en place une protection solaire (rayonnement) avec un gain de l'ordre de 85 % en termes de degrés-heures et de 50 % à 60 % en besoins. Le contrôle fonction du rayonnement permet de mieux se protéger contre les apports solaires extérieurs, les protections solaires contrôlées en fonction de la luminosité ne permettent qu'une réduction des besoins par rapport au cas de référence de l'ordre de 40 - 45 % (environ 20 - 25 % en ce qui concerne les degrés-heures).

L'utilisation de protections solaires impacte les consommations d'éclairage et de chauffage. Le Tableau 3.21 présente les résultats pour les pièces de bureaux de référence à Trappes et Nice. Si les protections solaires contrôlées en fonction de la luminosité n'ont que peu de conséquences sur ces usages (l'augmentation de 21 % des besoins de chauffage reflète les faibles besoins du cas de référence), les protections gérées en fonction du rayonnement occasionnent une forte augmentation des consommations d'éclairage. Cependant, dans les cas étudiés, des économies d'électricité seront réalisées si l'efficacité saisonnière de l'appareil de climatisation est supérieure à 6,3 pour Trappes et 8,4 pour Nice (l'efficacité d'un climatiseur neuf est de l'ordre de 3 actuellement). De plus, l'impact des protections sur l'éclairage se réduira avec l'installation de systèmes d'éclairage plus efficace.

Tableau 3.21. Impact de l'usage de protections solaires sur les consommations d'éclairage et les besoins de chauffage pour le bureau de référence à Trappes et Nice.

		Ecran (luminosité)	Ecran (rayonnement)
Augmentation des besoins de chauffage	Trappes	7 %	0 %
	Nice	21 %	0 %
Augmentation des consommations d'éclairage	Trappes	1,9 %	23,7 %
	Nice	2,3 %	42,7 %

■ Vitrage

Le vitrage est une solution très performante car dotée d'un facteur solaire faible. Ces gains en termes de besoins et de réduction d'inconfort sont du même ordre que pour les protections solaires contrôlées en fonction du rayonnement. D'autre part, cette solution présente également l'avantage de réduire significativement les besoins de chauffage (de 30 % à Trappes par exemple).

▪ Réduction des apports internes liés à l'éclairage

La réduction des apports internes par amélioration de l'éclairage n'engendre que de faibles gains par rapport aux autres solutions (réduction des besoins et des degrés-heures inférieure à 10 %). Elles sont cependant à favoriser car les gains en électricité sont importants, de l'ordre de 10 à 15 kWh/m².

▪ Ventilation naturelle

La ventilation naturelle appliquée aux bâtiments climatisés permet des gains importants, de l'ordre de 15 à 20 % lorsqu'elle est autorisée uniquement la nuit et de l'ordre de 20 à 30 % lors d'une utilisation diurne et nocturne.

Pour la ventilation naturelle diurne, les taux de renouvellement d'air engendrés sont beaucoup plus faibles que dans nos bâtiments de référence non climatisés (partie 3.2.1.3) et ne présentent donc pas de gêne pour les occupants. Le profil du taux de renouvellement d'air est tracé pour le mois d'août dans le cas de la pièce de bureaux à Nice et Trappes (Figure 3.17). Il se situe en moyenne autour de 1 volume/heure et la valeur maximale rencontrée s'élève à 3,5 volumes/heure.

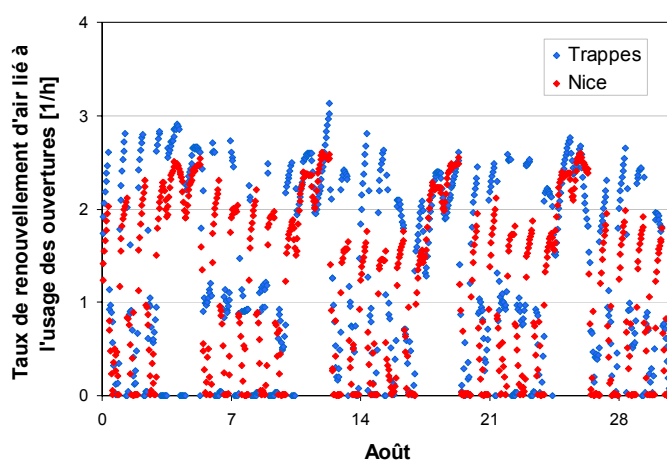


Figure 3.17. Taux de renouvellement d'air lié à l'usage des fenêtres dans les bâtiments climatisés.

En permettant une réduction d'environ 20 % des degrés-heures, la ventilation naturelle nocturne appliquée aux bâtiments non climatisés a un potentiel plus limité que les actions jouant sur le facteur solaire des parois. Cette solution ne permet pas d'évacuer de façon suffisamment importante les charges élevées de ces bâtiments.

▪ Ventilation mécanique

Si la ventilation mécanique permet des gains similaires à ceux de la ventilation naturelle, cette solution s'accompagne de consommations d'électricité. La Figure 3.18 présente l'efficacité saisonnière (ratio entre la réduction des besoins obtenue et la consommation électrique) dans les bureaux de référence climatisés en fonction des pertes de charge du système.

Avec nos hypothèses de pertes de charge, cette solution est très efficace, les efficacités sont en effet de l'ordre de 8,5. Attention cependant, car l'augmentation des pertes de charge peut vite handicaper cette solution et celle-ci ne permet pas de garantir seule des conditions confortables.

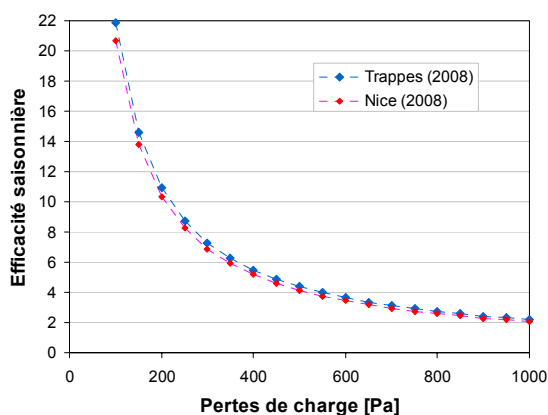


Figure 3.18. Evolution de l'efficacité saisonnière du système de ventilation mécanique en fonction des pertes de charge

Evaluation des ensembles d'actions

Les besoins de refroidissement et l'inconfort estival associés aux ensembles d'actions sont présentés sur les Figure 3.19a) et Figure 3.19b). Les besoins et inconfort des pièces de référence sont mentionnés dans les légendes de ces deux figures.

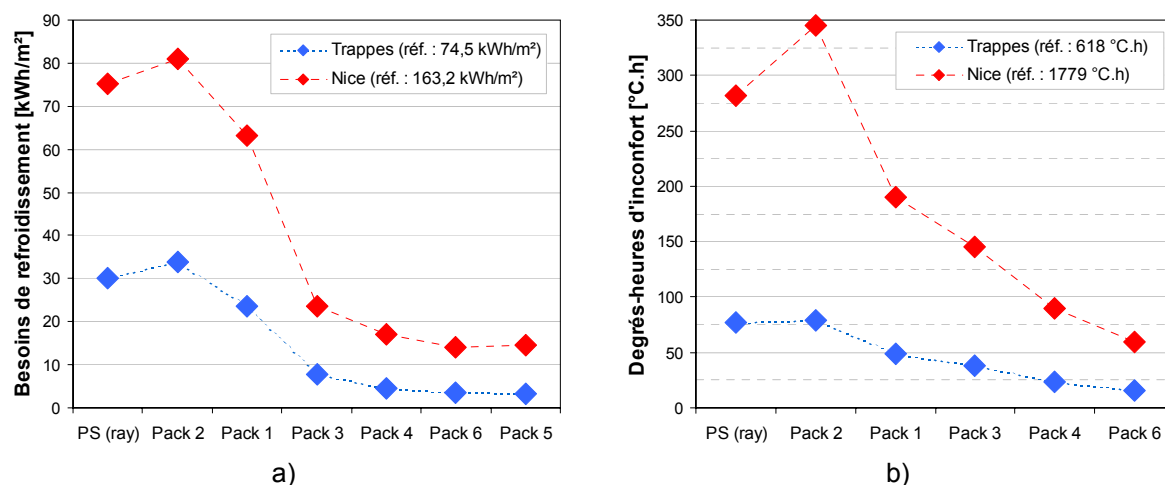


Figure 3.19. Impact des actions prises collectivement sur les besoins (a) et l'inconfort (b)

La mise en place d'un système d'éclairage efficace combiné à une protection solaire contrôlée en fonction du rayonnement (Pack 1) permet de réduire les besoins de 50 à 70 % et de 85 à 92 % en confort. Il est donc possible de réduire l'inconfort d'été de façon très significative en mettant en place une stratégie de réduction des apports internes et extérieurs.

La mise en place de toutes les actions (vitrage, protection, réduction des apports internes) associée à une ventilation mécanique ou une ventilation naturelle nocturne permet d'atteindre des besoins inférieurs à 20 kWh/m² à Nice et à 5 kWh/m² à Trappes, ce qui équivaut à une réduction de plus de 90 % par rapport aux pièces de référence. En termes de confort, les degrés-heures se voient réduits de plus de 95 %.

Des bâtiments confortables ?

Si les degrés-heures sont indispensables pour la suite de l'étude et notamment pour la monétisation de l'inconfort, cette notion reste cependant difficile à appréhender et, afin de mieux percevoir la qualité du confort intérieur, la Figure 3.20 présente le pourcentage d'heures d'occupation inconfortables. En se basant sur le critère de confort choisi en partie 3.1 (3 % d'inconfort annuel), nous remarquons que les meilleures actions individuelles (vitrage et protections solaires) permettent de rendre la pièce confortable à Trappes. Ceci reste beaucoup plus difficile à Nice où seule une rénovation importante (protection, réduction des apports internes et ventilation mécanique) donne lieu à une réduction du temps d'inconfort à moins de 3 % du temps d'occupation.

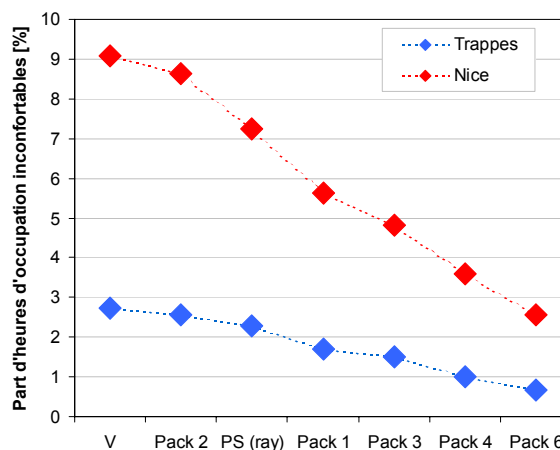


Figure 3.20. Part d'heures d'occupation inconfortables après la mise en place de différentes actions

3.2.3.3. Evaluation des différentes actions pour la boutique

En ce qui concerne la boutique, les besoins de refroidissement et l'inconfort estival sont présentés pour les ensembles d'actions et les actions individuelles sur les Figure 3.21a) et Figure 3.21b).

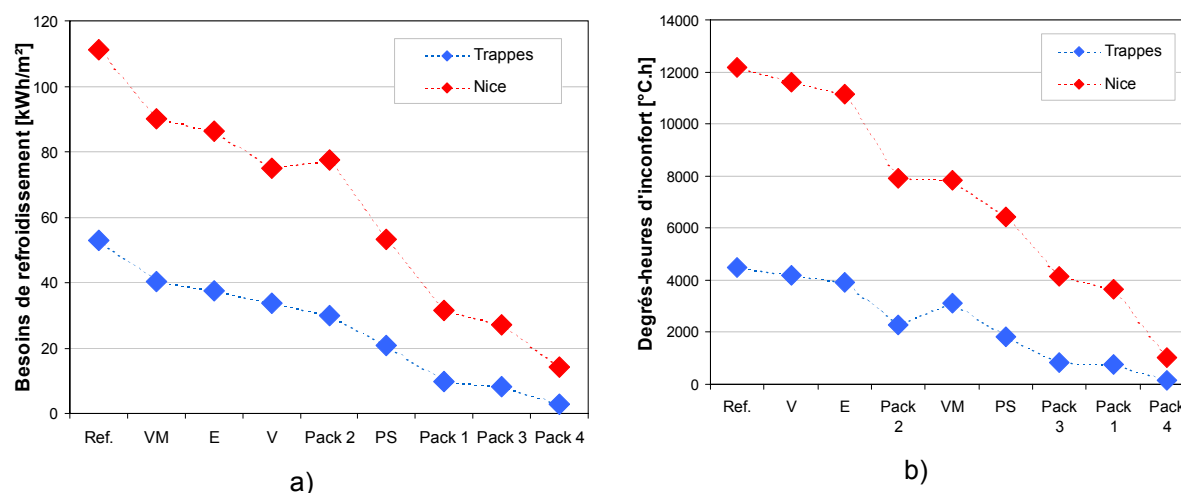


Figure 3.21. Impact des actions prises individuellement et collectivement sur les besoins (a) et l'inconfort (b)

Besoins de refroidissement

Dans le cas de la boutique, les meilleures actions d'amélioration sont celles qui diminuent le facteur solaire de la vitrine. La mise en place d'une protection solaire permet ainsi de réduire les besoins de refroidissement d'environ 50 à 60 %. La réduction des apports internes (éclairage) et la ventilation mécanique engendrent des gains moins importants, de l'ordre de 20 à 30 %.

La réduction des apports internes associés à une protection solaire (Pack 1) permet de réduire de 70 à 80 % les besoins de refroidissement et d'atteindre des niveaux de l'ordre de 10 kWh/m² à Trappes et 30 kWh/m² à Nice. La mise en place de l'ensemble des actions étudiées fait diminuer les besoins de refroidissement jusqu'à des niveaux très faibles : 3 kWh/m² à Trappes et 14 kWh/m² à Nice.

Inconfort estival

Pour la boutique, les degrés-heures d'inconfort sont calculés à partir de la température opérative de 26 °C car les moyens d'adaptation sont insuffisants pour pouvoir se baser sur les zones de confort adaptatives. L'inconfort peut être réduit spectaculairement :

- de 70 à 85 %, en réduisant les apports internes et en installant une protection solaire,
- et de 90 à 95 % en mettant en place toutes les actions.

Attention cependant, il n'est pas possible de respecter le critère de confort excepté en mettant en place toutes les actions et seulement pour le climat de Trappes.

3.2.4 Description technique des actions étudiées pour le résidentiel

Les leviers permettant d'améliorer le confort d'été dans le secteur résidentiel sont moins nombreux que pour le tertiaire. Nous avons choisi de nous concentrer sur les actions suivantes :

- vitrages performants,
- protections solaires,
- réduction des apports internes,
- ventilation naturelle.

3.2.4.1. Vitrages performants

L'installation de vitrages à faibles facteurs solaires est une action envisageable dans le secteur résidentiel. Elle permet d'allier réduction des consommations de chauffage et amélioration de l'inconfort estival. Le vitrage déjà présenté pour le secteur tertiaire est retenu comme action d'amélioration du confort d'été dans le secteur résidentiel.

3.2.4.2. Réduction des apports internes

Les moyens permettant de réduire les apports internes dans les résidences sont très variés : réduction de la consommation d'électroménager, réduction des apports de cuisson, isolation de la boucle d'eau chaude sanitaire....

Si limiter l'usage des équipements de cuisson et s'équiper d'appareils économes est intéressant à la fois pour réduire les consommations spécifiques et pour améliorer le confort d'été, nous avons choisi de ne pas étudier ce type d'actions principalement parce que les réductions de besoins ou d'inconfort sont faibles par rapport aux autres solutions. La Figure 3.22 présente les gains de refroidissement et de confort pouvant être obtenus en réduisant d'un facteur 2 les apports internes. Cette diminution draconienne des apports de chaleur n'engendre que de faibles réductions des besoins (10 à 15 %) et des degrés heures (17 à 30 %)⁸⁰.

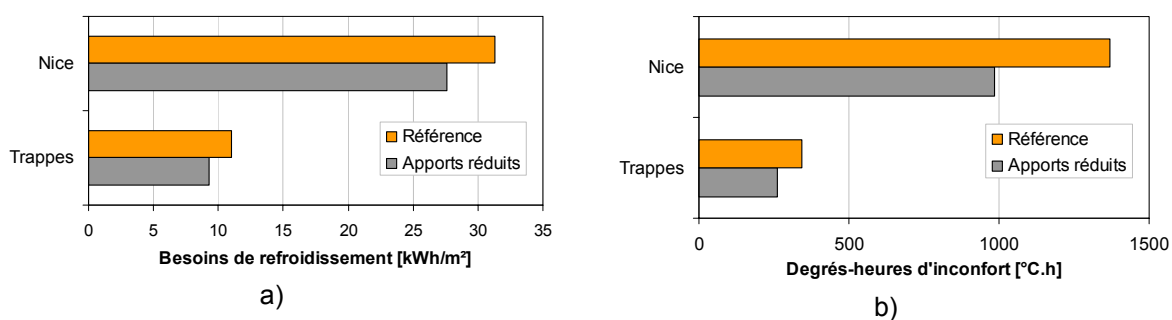


Figure 3.22. Influence d'une réduction des apports internes sur les besoins de refroidissement et l'inconfort de l'appartement

3.2.4.3. Protections solaires

Concernant les protections solaires, l'action étudiée consiste à utiliser une protection extérieure (ou des volets existants) de facteur solaire 0,1. Entre le 1^{er} mai et le 30 septembre, ces protections sont totalement baissées pendant la journée en périodes d'inoccupation. En période d'occupation, des protections solaires sont utilisées comme dans le cas de référence.

3.2.4.4. Ventilation nocturne

Une troisième action consiste à favoriser la ventilation nocturne dans les bâtiments non climatisés. Les fenêtres sont ouvertes sur 10 % de leur surface lorsqu'à partir de 23 h, la température intérieure est supérieure à 23 °C et dès que la différence de température entre l'extérieur et l'intérieur permet un rafraîchissement.

3.2.4.5. Portfolio

Les Tableau 3.22 et Tableau 3.23 décrivent les actions retenues pour les appartements. Tout comme la ventilation naturelle nocturne, la mise en place de protections solaires peut être considérée comme une action comportementale. Elle porte alors sur la gestion des volets.

⁸⁰ Comme nous le verrons par la suite, ces valeurs sont à comparer par exemple aux réductions des besoins et des degrés-heures de 90 - 95 % obtenus à l'aide de protections solaires par exemple.

Tableau 3.22. Actions retenues pour l'appartement climatisé

Actions	Acronyme	Description
Mise en place de protections solaires	PS	Facteur solaire de 0,1 – Baissées en inoccupation l'été
Installation de vitrages à faible facteur solaire	V	Facteur solaire de 0,298 – Transmission visible 0,383 U=1,3 W/m ² /K

Tableau 3.23. Actions retenues pour l'appartement en ventilation naturelle

Actions	Acronyme	Description
Mise en place de protections solaires	PS	Facteur solaire de 0,1 – Baissées en inoccupation l'été
Installation de vitrages à faible facteur solaire	V	Facteur solaire de 0,298 – Transmission visible 0,383 U=1,3 W/m ² /K
Ventilation naturelle nocturne	VN	Ouverture de 10 % de la surface vitrée à partir de 23 h lorsque cela permet un rafraîchissement.

Toutes les combinaisons possibles des actions présentées dans les Tableau 3.22 et Tableau 3.23 ont été simulées. Le Tableau 3.24 associe une appellation aux différents ensembles d'actions étudiés.

Tableau 3.24. Description des ensembles d'actions présentés par la suite

Appartement climatisé	
Pack 1	PS + V
Appartement en ventilation naturelle	
Pack 1	PS + VN
Pack 2	V + VN
Pack 3	PS + VN + V

3.2.5 Potentiel de réduction des besoins de refroidissement et d'amélioration du confort dans le secteur résidentiel

3.2.5.1. Résultats obtenus en termes de réduction des besoins de refroidissement

Comme le montre la Figure 3.23, une stratégie de protection des apports solaires permet de réduire pour une grande part les besoins de climatisation, de l'ordre de 50 - 70 % en installent des fenêtres à faible facteur solaire, et de 80 - 90 % en utilisant des protections solaires ou des volets.

La mise en place conjointe des deux actions réduit les besoins de refroidissement à moins de 1 kWh/m² à Trappes et à moins de 6 kWh/m² à Nice.

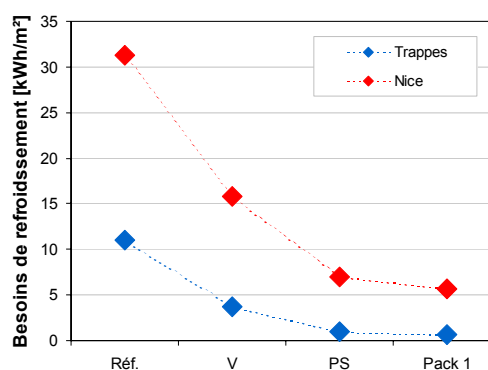


Figure 3.23. Impact des actions d'amélioration sur les besoins dans le résidentiel

3.2.5.2. Résultats obtenus en termes de réduction de l'inconfort

Les degrés-heures d'inconfort sont présentés pour les ensembles d'actions et les actions individuelles sur les Figure 3.24a) et Figure 3.24b). Les protections solaires extérieures constituent une solution à privilégier car elles réduisent de près de 95 % les degrés-heure d'inconfort.

Selon le critère de confort retenu, la pièce situé à Trappes est confortable à partir du moment où une des actions a été mise en place. A Nice, les actions de ventilation naturelle ou de remplacement des vitrages ne permettent pas seules de remplir le critère de confort car la part d'heures d'occupation inconfortables s'élève alors à respectivement 8 % et 13 %. Le recours aux protections solaires ou à un des ensembles d'actions étudiés aboutit à des conditions climatiques confortables.

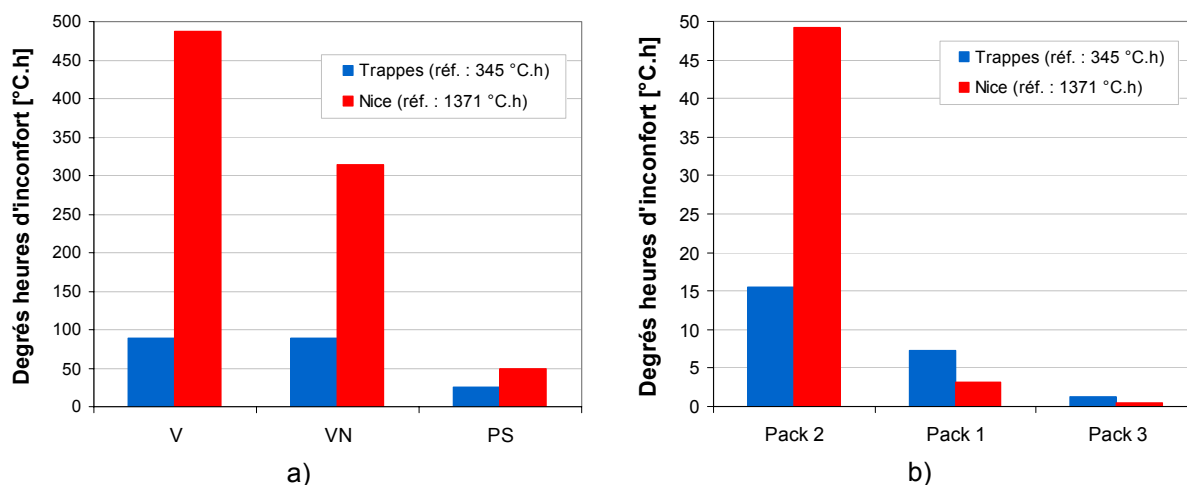


Figure 3.24. Impact des actions prises individuellement (a) et collectivement (b) sur l'inconfort estival

Afin d'évaluer l'importance que pouvait avoir le comportement des occupants sur le confort d'été, les besoins de refroidissement et les heures d'inconfort ont été calculés dans le cas où les protections solaires extérieures étaient baissées uniquement en période d'occupation. Le Tableau 3.25 présente les résultats obtenus et les compare à ceux engendrés par l'action décrite précédemment (protections fermées en inoccupation l'été). Il apparaît ici que le comportement des occupants est essentiel pour réduire l'inconfort estival car des protections solaires uniquement utilisées en période d'occupation ne permettent que de faibles améliorations par rapport à une gestion optimisée de celles-ci.

Tableau 3.25. Comparaison entre deux modes de gestion des protections solaires

		Protection en périodes d'occupation et d'inoccupation	Protection en périodes d'occupation
Trappes	Besoins [kWh/m²]	1	6,9
	Part d'heures inconfortable [%]	1	5
Nice	Besoins [kWh/m²]	7	22,9
	Part d'heures inconfortable [%]	3	15

3.3 Etude du confort d'été dans les bâtiments rénovés dans une optique de réduction des consommations de chauffage

En raison de la composition du parc et de la durée de vie des bâtiments, une part importante des bâtiments sera rénovée dans les décennies à venir. Ces rénovations incluent à la fois des remplacements d'installations de chauffage mais aussi des améliorations de l'enveloppe des bâtiments (isolation, vitrage, infiltration) qui, dans un pays tel que la France, sont essentiellement mises en place dans le but de réduire les consommations d'énergie en chauffage. L'objectif de cette partie est d'étudier l'impact, sur le confort d'été, de mesures de rénovation des parois opaques et vitrées.

3.3.1 Impact d'actions de rénovation orientées « chauffage » sur le confort d'été

3.3.1.1. Impact de l'isolation des parois opaques sur les besoins de refroidissement et le confort d'été

Description technique des actions retenues

Même si elle conduit à de meilleures performances thermiques⁸¹, l'isolation extérieure des parois verticales est assez peu développée en France et notamment dans la rénovation (opération plus délicate et parfois plus chère, modification de l'aspect extérieur du bâtiment...). Aussi, concernant les parois verticales, seule l'isolation intérieure sera considérée dans cette étude. Pour les toitures plates, l'isolation extérieure ne présente généralement pas de difficulté majeure et est étudiée par la suite.

Que ce soit pour la toiture ou les parois verticales, la conductivité thermique de l'isolant retenu est de 0,029 W/m.K (valeur caractéristique d'un isolant composé de mousse de polyuréthane par exemple). Par la suite, les coefficients thermiques des parois intègrent à la fois les parois déperditives et les ponts thermiques.

Impact de l'isolation sur le comportement des bâtiments en été

L'isolation des parois, qui permet de réduire les transferts de chaleur à travers les différentes parois, peut être à l'origine de phénomènes entraînant une amélioration ou une détérioration du confort d'été. Si la température extérieure de la paroi est supérieure à la température intérieure, l'isolation permet de réduire les besoins de refroidissement en été. Au contraire, dans un bâtiment isolé, les apports de chaleurs extérieurs (solaires) ou internes peuvent être piégés à l'intérieur, augmentant ainsi l'inconfort ou les besoins de refroidissement⁸². L'impact de l'isolation sur le confort d'été peut donc s'avérer positif ou néfaste, il est intimement lié aux caractéristiques du bâtiment (charges internes, protections solaires) et au climat.

La Figure 3.25a) présente l'impact du niveau d'isolation des parois sur les besoins de refroidissement pour le bâtiment de bureaux de référence situé à Trappes. Une réduction des besoins de chauffage de 30 % s'accompagne d'une augmentation du refroidissement d'un peu moins de 30%. Lorsque les apports solaires (protection solaires extérieures) et les apports internes (dus à l'éclairage) ont été réduits, le phénomène reste observable (Figure 3.25b)).

⁸¹ Même en été car l'inertie disponible est alors plus importante.

⁸² Ce phénomène est couramment appelé effet « thermos ».

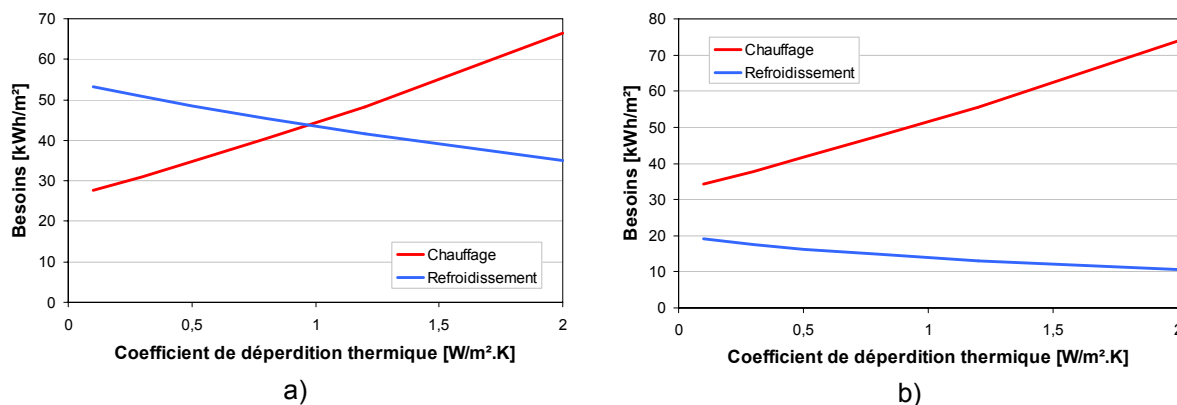


Figure 3.25. Evolution des besoins de chauffage et de refroidissement en fonction du niveau d'isolation pour le bâtiment de bureau à Trappes, sans mesures d'amélioration du confort d'été (a) et avec des protections solaires extérieures et une réduction des apports internes (b)

A Nice, où les températures extérieures sont plus élevées et l'effet positif de l'isolation sur le confort d'été devrait être exacerbé, on retrouve une augmentation des besoins de refroidissement que ce soit pour le bâtiment de référence (Figure 3.26a)) ou dans le cas où les apports extérieurs et internes ont été réduits (Figure 3.26b)).

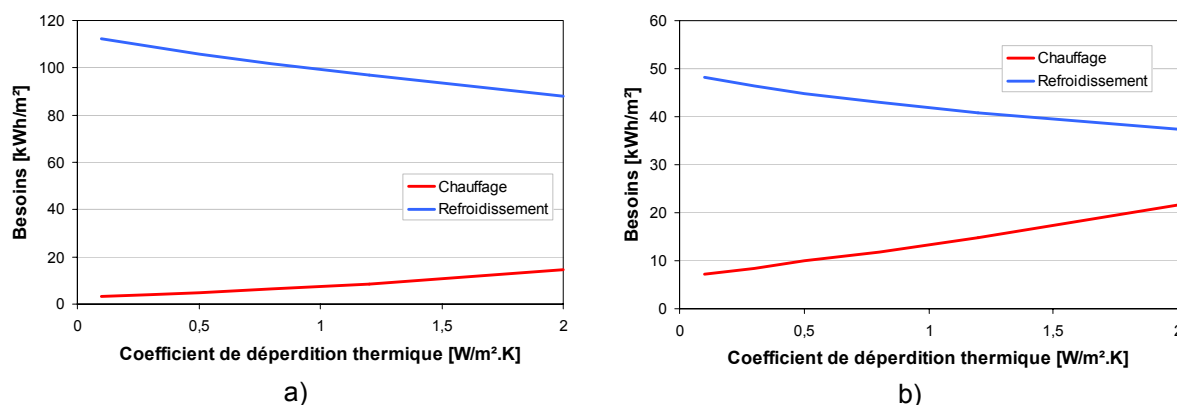


Figure 3.26. Evolution des besoins de chauffage et de refroidissement en fonction du niveau d'isolation pour le bâtiment de bureau à Nice, sans mesures d'amélioration du confort d'été (a) et avec des protections solaires extérieures et une réduction des apports internes (b)

L'étude du confort thermique en ventilation naturelle aboutit à des conclusions allant dans le même sens que celles obtenues pour les pièces climatisées : l'inconfort estival se dégrade lorsque l'on augmente l'isolation des parois opaques. Ainsi, pour la pièce de bureau de référence, les degrés-heures d'inconfort s'accroissent de 25 % à Trappes et de 20 % à Nice lorsque l'on passe d'un coefficient de déperdition thermique de 2 à un coefficient égal à 1 (Figure 3.27).

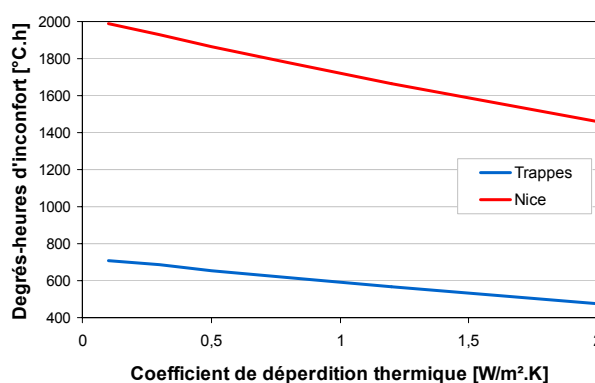


Figure 3.27. Evolution des degrés-heures d'inconfort en fonction du niveau d'isolation pour le bâtiment de bureaux

Dans le cas de l'appartement, où les apports thermiques sont plus faibles, le phénomène reste observable à la fois en besoins et en confort (Figure 3.28a) et b)). Ainsi, l'appartement de référence

doté de parois de coefficient de déperdition thermique égal à 0,1 (c'est le cas des maisons passives) serait inconfortable pendant 9,5 % du temps d'occupation à Trappes et pendant 22,5 % à Nice.

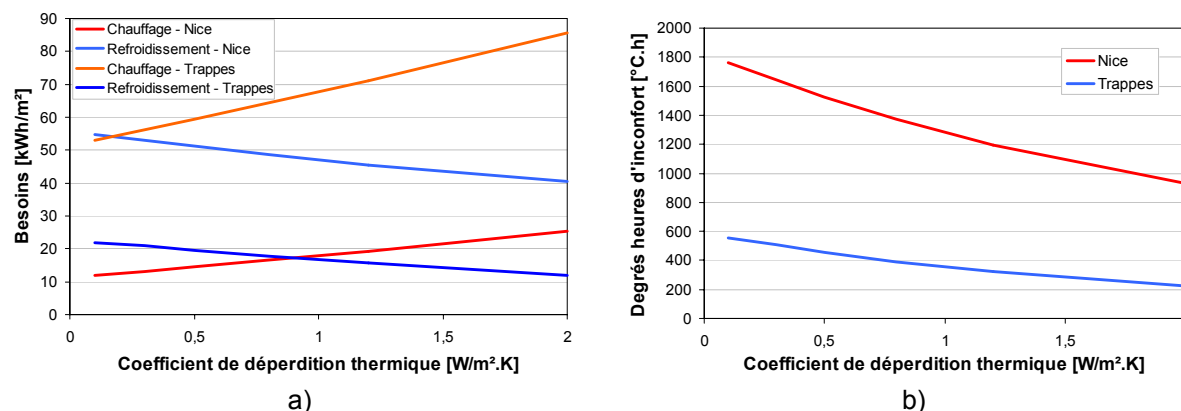


Figure 3.28. Evolution des besoins de chauffage et de refroidissement en fonction du niveau d'isolation pour l'appartement de Trappes (a) et Nice (b)

En ce qui concerne l'isolation de la toiture, des simulations ont été effectuées en supposant un coefficient de déperdition thermique de 0,2 W/m.K. Les résultats obtenus sont présentés Figure 3.29a pour le bâtiment de bureaux et Figure 3.29b pour l'appartement à la fois dans la configuration de référence mais aussi lorsque des mesures de réduction des apports de chaleur ont été mises en place. Il apparaît qu'une meilleure isolation de la toiture augmente les besoins de refroidissement de 5 à 10 % pour le bâtiment de bureaux et de 10 à 20 % pour l'appartement.

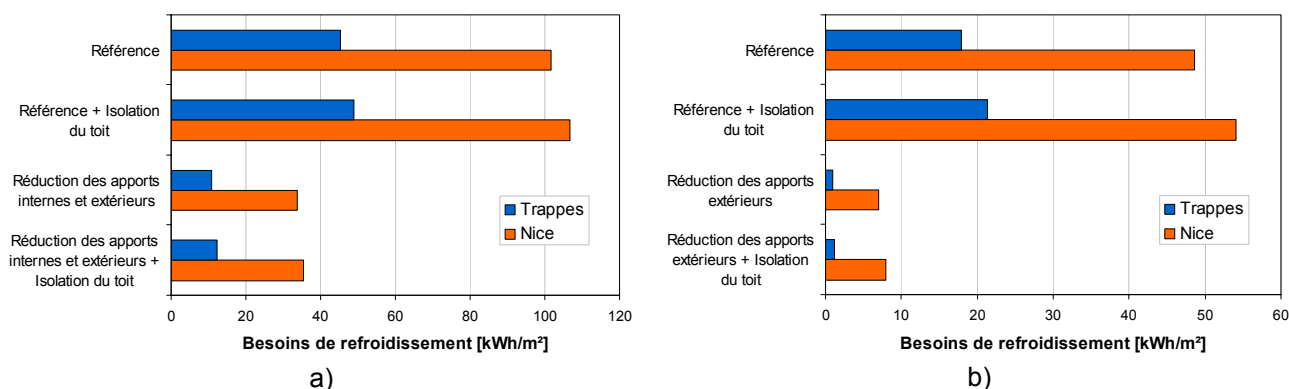


Figure 3.29. Besoins de refroidissement du bâtiment de bureaux (a) et de l'appartement (b) - Le coefficient de déperdition thermique de la toiture isolée est de 0,2 W/m.K.

3.3.1.2. Impact du remplacement des vitrages sur le confort d'été

Description technique

Comme expliqué précédemment, un vitrage se caractérise principalement par trois grandeurs : le facteur solaire, la transmission lumineuse et le coefficient de déperdition thermique.

Il est possible d'adapter le facteur solaire du vitrage au climat et à la nécessité de réduire ou non les apports solaires. La Figure 3.30a) présente les facteurs solaires et les coefficients de déperdition thermique pour différents vitrages. Un faible facteur solaire étant obtenu par l'utilisation de couche faiblement émissive ou d'un traitement réfléchissant qui n'ont pas nécessairement d'effet sur le coefficient de transfert thermique, il n'existe pas de corrélation entre ces deux caractéristiques. On peut trouver aujourd'hui des vitrages permettant d'améliorer à la fois le confort d'hiver par des coefficients de déperdition thermique faibles et le confort d'été grâce à des facteurs solaires faibles eux aussi.

La Figure 3.30b) présente le facteur solaire et la transmission lumineuse de différents vitrages existants (Marchio, 2009). La zone rouge correspond à des couples impossibles en raison du fait que l'énergie solaire est composée pour 50 % de lumière visible. La réduction du facteur solaire s'accompagne généralement d'une diminution de la transmission lumineuse.

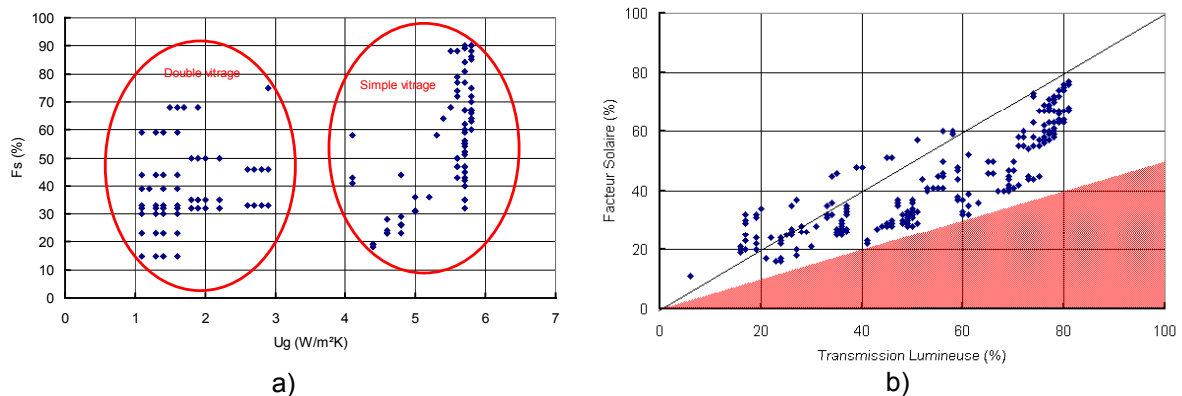


Figure 3.30. Facteurs solaires et coefficients de déperdition thermique pour différents vitrages (a) Facteurs solaires et coefficients de transmission lumineuse pour différents vitrages (b) (Marchio, 2009)

Impact sur le confort d'été

L'impact des vitrages suivants est étudié :

- Double vitrage 4/15/4 : facteur solaire de 0,609, transmission lumineuse de 0,785 et coefficient de déperdition thermique de 1,1
- Double vitrage 6/16/6 : facteur solaire de 0,315, transmission lumineuse de 0,5 et coefficient de déperdition thermique de 1,09

A l'instar de l'isolation des parois opaques, mais dans une moindre mesure, une fenêtre plus isolante (toutes choses égales par ailleurs) augmente les besoins de refroidissement (Tableau 3.26 et Tableau 3.27). Toutefois, il est possible de réduire ces besoins en utilisant un vitrage à faible facteur solaire, ce qui augmente, par là même, les besoins de chauffage et souvent les consommations d'éclairage. Ces dernières s'accroissent ainsi de 14 % pour le bâtiment de bureaux situé à Trappes.

Tableau 3.26. Comparaison de trois types de vitrage sur les besoins du bâtiment de bureaux à Trappes et ses consommations d'éclairage

	U	FS	TL	Chauffage [kWh/m²]	Refroidissement [kWh/m²]	Eclairage [kWh/m²]
Double vitrage 4/8/4	3	0,777	0,727	40,37	45,31	33,68
Double vitrage 4/15/4	1,1	0,609	0,782	18,01	57,4	36,64
Double vitrage 6/16/6	1,09	0,315	0,5	25,99	27,46	38,3

Tableau 3.27. Comparaison de trois types de vitrage sur les besoins de l'appartement à Trappes et ses consommations d'éclairage

	U	FS	TL	Chauffage [kWh/m²]	Refroidissement [kWh/m²]	Eclairage [kWh/m²]
Double vitrage 4/8/4	3	0,777	0,727	64,3	17,9	11,8
Double vitrage 4/15/4	1,1	0,609	0,782	43,3	23,2	12,2
Double vitrage 6/16/6	1,09	0,315	0,5	54,4	7	12,4

3.3.1.3. Une détérioration du confort d'été à traiter

Comme nous venons de le montrer, l'isolation des parois opaques et vitrées est généralement à l'origine d'une augmentation des besoins de refroidissement et de l'inconfort estival. Ces résultats sont en accord avec d'autres études menées sur le sujet.

Ainsi, Feldmann et Schwarzberg (2009) ont étudié le lien entre isolation renforcée et inconfort d'été. Trois niveaux d'isolation ont été comparés : RT 2005, RT 2005 renforcée et maison passive pour trois types de bâtiment (maison individuelle, bâtiments collectifs d'habitation et rénovation de bâtiments de bureaux). Des simulations ont été effectuées afin d'estimer le nombre d'heures de surchauffe (voir le Tableau 3.28 dans le cas de la maison individuelle) et les résultats montrent une nette augmentation des heures de surchauffe avec le renforcement de l'isolation, et ce pour tous les types de bâtiments.

Tableau 3.28. Nombre d'heures de surchauffe pour une maison individuelle (approche par simulation) (Feldmann et Schwarzberg, 2009)

Niveau d'isolation	Nombre d'heures estivales où la température intérieure > 28 °C			
	Belfort	Trappes	Nice	Athènes
RT 2005	284	234	2245	3338
RT 2005 +	470	491	3160	4017
Maison passive	2396	2677	4599	4680

Des travaux de simulation similaires ont mis évidence l'effet néfaste que peut avoir la sur-isolation sur le confort d'été. Dans des contextes anglais et suédois, Orme et Palmer (2003) montrent que l'application de réglementations à venir en matière de performance des bâtiments pouvaient entraîner une augmentation de 16 % des heures de surchauffe (27 °C) dans le cas d'une maison individuelle par rapport aux pratiques actuelles.

Des études menées sur le terrain débouchent sur des conclusions semblables. Ainsi, Deschaseaux (2009) rapporte que des mesures effectuées entre le 1^{er} juin 2008 et le 28 août 2008 (période sans épisode caniculaire) sur une maison HQE de Lyon et un bureau HQE situé à Valence ont montré que la température opérative y était supérieure à 26 °C pendant, respectivement, 24 % et 25 % du temps. Les campagnes de mesure menées en 2003 (avant la canicule d'août) à Lyon par Sidler (2004) ont permis de montrer que les bâtiments très peu consommateurs d'énergie, qu'ils soient neufs ou rénovés, étaient le siège de surchauffes importantes en été. Les températures moyennes pendant le mois de juin étaient ainsi comprises entre 29,3 °C et 30,5 °C selon les logements.

3.3.2 Amélioration du confort d'été dans les bâtiments rénovés

En France, le chauffage étant généralement le principal poste de consommation, l'amélioration de l'isolation de l'enveloppe des bâtiments est théoriquement une des premières mesures de rénovation à entreprendre (point de vue économique et énergétique). Nous avons vu que cela pouvait s'accompagner d'une augmentation de l'inconfort estival et il nous a semblé dès lors important d'étudier comment et dans quelle mesure le comportement estival de bâtiments rénovés pouvait être amélioré.

Les bâtiments de référence présentés en partie 3.1.2.2 ont donc été simulés avec les caractéristiques thermiques données dans le Tableau 3.29. Celles-ci correspondent à un niveau renforcé de la RT 2005.

Tableau 3.29. Parois retenues pour les bâtiments rénovés

	Description	U [W/m².K]
Parois verticales	0,085 mm d'isolant	0,3
Toiture	0,13 mm d'isolant	0,2
Vitrage	Double vitrage 4/16/4 (facteur solaire : 0,62)	1,4

3.3.2.1. Etude des besoins de refroidissement

Toutes les actions d'amélioration du confort d'été présentées dans la partie 3.2.2 ont été simulées dans le cas de bâtiments rénovés.

En ce qui concerne les pièces de bureaux, la hiérarchisation des actions, en termes de réduction des besoins, a évolué par rapport à celle établie à partir des pièces de référence. En effet, si l'installation de protections solaires était l'action individuelle la plus prometteuse, elle est maintenant devancée par les actions consistant à remplacer les vitrages (Figure 3.31a)). Cette dissemblance n'est pas due à une différence de facteur solaire de l'ensemble comprenant la vitre et la protection solaire mais au fait que, dans les cas de référence, le vitrage était à l'origine de deux effets contradictoires en termes de réduction des besoins : l'amélioration du facteur solaire et l'augmentation de l'isolation. Dans le cas de bâtiments rénovés, ce dernier effet est quasiment nul, améliorant ainsi les performances d'un vitrage à faible facteur solaire.

Les actions de ventilation naturelle ou mécanique qui permettent d'extraire de la chaleur et de réduire l'effet « thermos », voient, elles-aussi, leur potentiel augmenter. Ainsi, la ventilation naturelle diurne et nocturne qui permettait de réduire de 20 - 30 % des besoins des pièces de référence donne lieu, dans les pièces rénovées, à des réductions de besoins de l'ordre de 35 - 50 % (Figure 3.31a)).

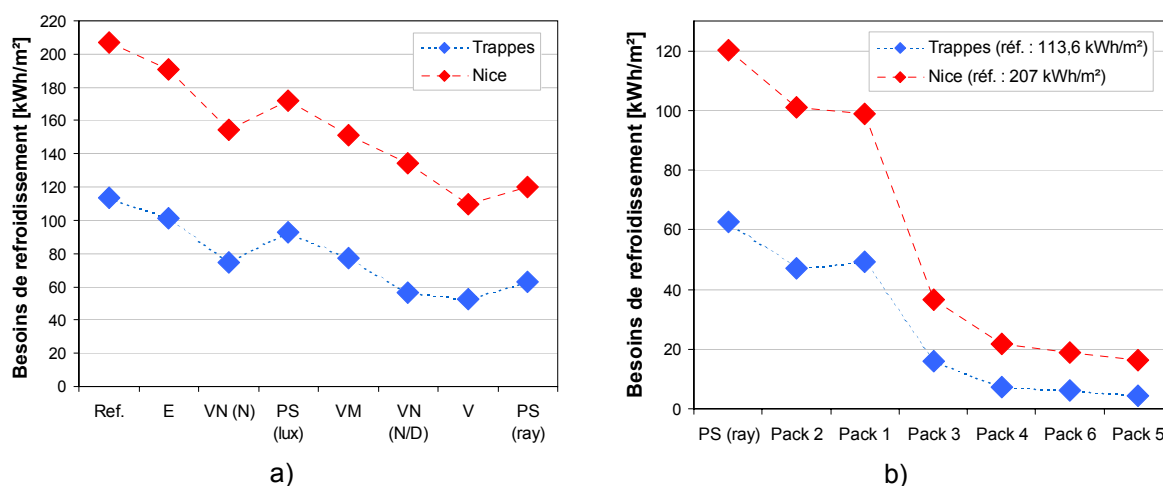


Figure 3.31. Impact des actions prises individuellement (a) et collectivement (b) sur les besoins de refroidissement

La Figure 3.32 présente une comparaison entre les résultats obtenus pour les pièces de bureaux de référence et ceux obtenus pour les pièces rénovées. Lorsqu'aucune stratégie d'amélioration de la situation d'été n'est entreprise, les besoins de refroidissement augmentent très fortement, de 55 % pour Trappes à 30 % pour Nice. Cependant, à l'instar des bâtiments non rénovés, il est possible d'atteindre des niveaux de besoins très faibles en mettant en place une stratégie de réduction des apports de chaleur associée à de la ventilation. Les besoins de refroidissement atteignent alors des niveaux de l'ordre de 5 kWh/m² à Trappes et de 20 kWh/m² à Nice (Figure 3.32).

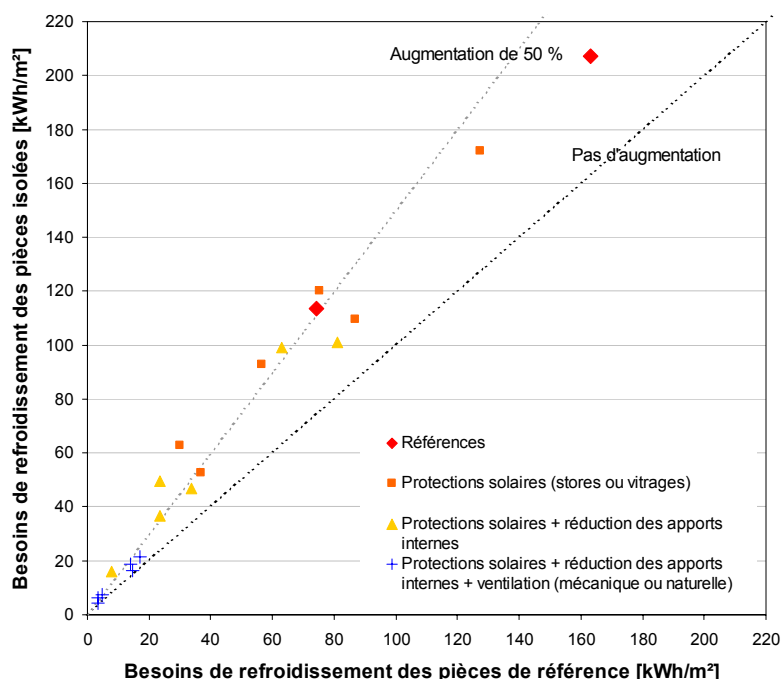


Figure 3.32. Comparaison des besoins de refroidissement des pièces de bureaux rénovées à ceux des pièces de référence

En ce qui concerne la boutique, les résultats obtenus dans les bâtiments rénovés sont similaires à ceux établis à partir des bâtiments de référence et la hiérarchisation des actions en termes de performance est notamment identique. Du fait de sa géométrie, l'amplitude des différences entre les besoins des bâtiments rénovés et ceux des bâtiments de référence est peu élevée. Ils augmentent de 14 % à Trappes et de 7 % à Nice mais, de même que pour les bureaux, peuvent être réduits à des niveaux de besoins similaires à ceux des bâtiments non rénovés en mettant en place des stratégies de réduction des apports de chaleur associées à de la ventilation. Ainsi, les besoins de refroidissement varient de 10 kWh/m² (Trappes) à 30 kWh/m² (Nice) une fois les apports réduits et de 4 kWh/m² à Trappes à 15 kWh/m² à Nice si l'on y ajoute de la ventilation mécanique.

En ce qui concerne la résidence, les résultats obtenus dans les bâtiments rénovés sont similaires à ceux établis à partir des bâtiments de référence.

L'isolation du bâtiment s'est toutefois accompagnée d'une augmentation des besoins de l'ordre de 50 % (Figure 3.33). Cette forte croissance est à relativiser au regard de l'impact des actions d'amélioration du confort d'été qui permettent, là encore, de réduire très significativement les besoins de refroidissement, et d'atteindre des niveaux de besoins similaires à ceux des bâtiments non rénovés.

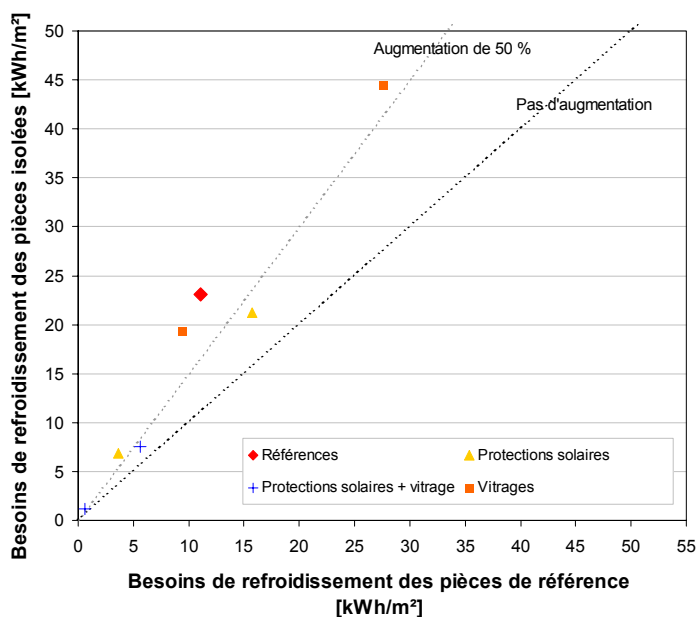


Figure 3.33. Comparaison des besoins de refroidissement de la pièce résidentielle rénovée à ceux de la pièce de référence

3.3.2.2. Amélioration du confort d'été dans les bâtiments rénovés

En ce qui concerne le confort dans la pièce de bureaux non climatisée, les résultats obtenus dans les bâtiments rénovés sont similaires à ceux établis à partir des bâtiments de référence.

L'isolation du bâtiment engendre cependant une augmentation d'environ 20 % de la période d'inconfort (Figure 3.34) et des degrés-heures d'inconfort.

Comme le révèle la Figure 3.34, les actions qui réduisaient l'inconfort à moins de 5 % du temps dans les pièces de référence le permettent généralement aussi dans les bâtiments rénovés. Dans le pire des cas (Nice), l'association de la réduction des apports internes, des apports solaires et de la ventilation nocturne permet de réduire à 3 % les heures d'occupation inconfortables.

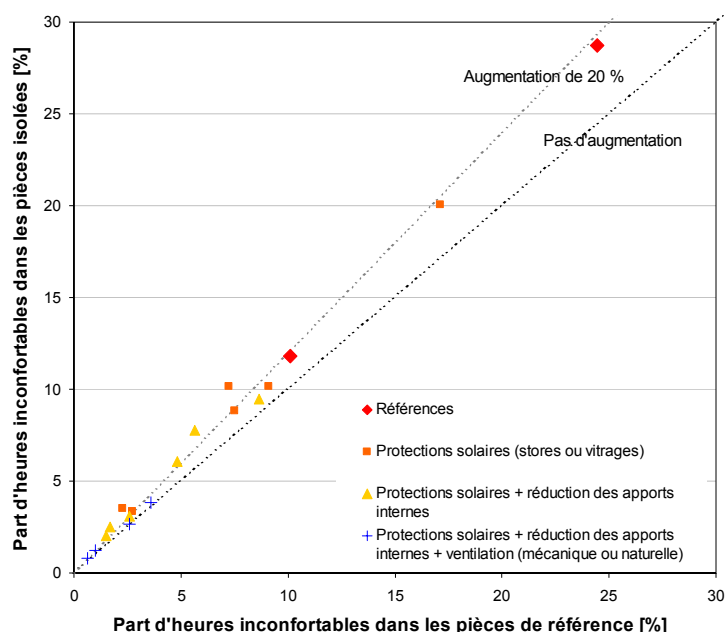


Figure 3.34. Comparaison du pourcentage d'heures inconfortables de la pièce de bureau rénovée à celui de la pièce de référence

En ce qui concerne la boutique, l'augmentation de l'inconfort est moins importante (de l'ordre de 10 % en termes de degrés-heures) et la mise en place de stratégies d'amélioration du confort d'été permet de retrouver des conditions de confort similaires à la situation avant rénovation.

La Figure 3.35 présente une comparaison entre les périodes d'inconfort rencontrées dans les pièces résidentielles de référence, avant et après rénovation. Le nombre d'heures d'inconfort se voit augmenter d'un facteur 2 environ. Cependant, un comportement adapté (ventilation naturelle, protections) permet, et ce pour tous les climats, de limiter l'inconfort à moins de 3 % du temps d'occupation (Figure 3.35).

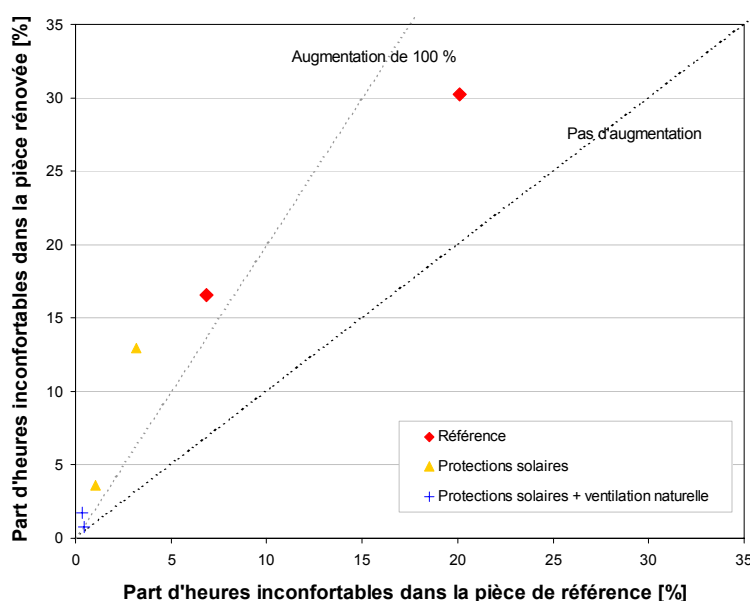


Figure 3.35. Comparaison du pourcentage d'heures inconfortables de la pièce résidentielle rénovée à celui de la pièce de référence

3.3.3 Conclusions

Les résultats de simulation présentés dans cette partie montrent que l'isolation renforcée des bâtiments rénovés peut être à l'origine d'une augmentation de l'inconfort d'été et des besoins de refroidissement. A titre d'exemple, l'application de réglementations à venir en matière de performance des bâtiments pourrait entraîner une multiplication par un facteur 2 des heures de surchauffe dans le cas d'une pièce résidentielle par rapport aux pratiques actuelles.

Des solutions simples permettent cependant de réduire l'inconfort estival à des niveaux acceptables, du même ordre que dans les bâtiments non rénovés. Si la rénovation de l'enveloppe des bâtiments est nécessaire dans le but de réduire les consommations de chauffage, le développement des logements à faible consommation d'énergie doit donc s'accompagner d'une stratégie efficace de lutte contre l'inconfort estival.

3.4 Confort d'été et perspective du changement climatique

3.4.1 Changement climatique : adaptation et atténuation

3.4.1.1. Les prévisions du GIEC en matière de réchauffement climatique

La Figure 3.36 (à gauche) présente les émissions mondiales de GES, établies par le GIEC (2007), selon six scénarios socio-économiques de référence (B1, B2, A2...). Chaque scénario regroupe un ensemble d'hypothèses cohérentes concernant les évolutions démographique, économique et sociologique de la planète. A titre d'exemple, le scénario B1 suppose, que la population mondiale culmine à 9 milliards d'individus en 2050 avant de décroître, que les nouvelles technologies énergétiquement efficaces sont massivement utilisées, et que l'économie est dominée par les services et les technologies de l'information. Au contraire, le scénario A2 repose sur, une forte croissance démographique (15 milliards d'individus en 2100), de faibles contraintes sur le recours à l'énergie, et une pénétration de nouvelles technologies énergétiquement efficaces très hétérogènes selon les régions... Les scénarios A2 et B1 décrivent donc des évolutions du monde très contrastées qui se traduisent, pour le premier, par une croissance continue des émissions de GES d'un facteur 3,5 d'ici à 2100, et pour le second, par une augmentation des émissions d'ici 2040 puis une réduction permettant d'atteindre en 2100 des niveaux plus faibles que ceux d'aujourd'hui (Figure 3.36 à gauche).

Outre les scénarios socio-économiques, les prévisions établies par le GIEC dépendent des modèles climatiques utilisés qui diffèrent dans la prise en compte de certains phénomènes (influence des nuages, de la chimie atmosphérique, de la végétation...). Ainsi, les évolutions du réchauffement mondial en surface⁸³ données sur la Figure 3.36 (à droite) correspondent à des moyennes effectuées entre les résultats de différents modèles climatiques pour un scénario socio-économique donné (ici A2, A1B et B1). Pour chaque scénario, les barres de droite précisent la dispersion des élévations de température calculées par les différents modèles. Ainsi, si l'élévation de température moyenne est de l'ordre de 3,5 °C pour le scénario A2, les modèles climatiques utilisés aboutissent à des valeurs comprises entre 2 °C et 5,4 °C.

Au final, le GIEC (2007) envisage une dérive climatique variant d'ici 2100 de 1,1 °C à 6,4 °C selon les scénarios d'émission et les modèles climatiques utilisés (Figure 3.36, à droite).

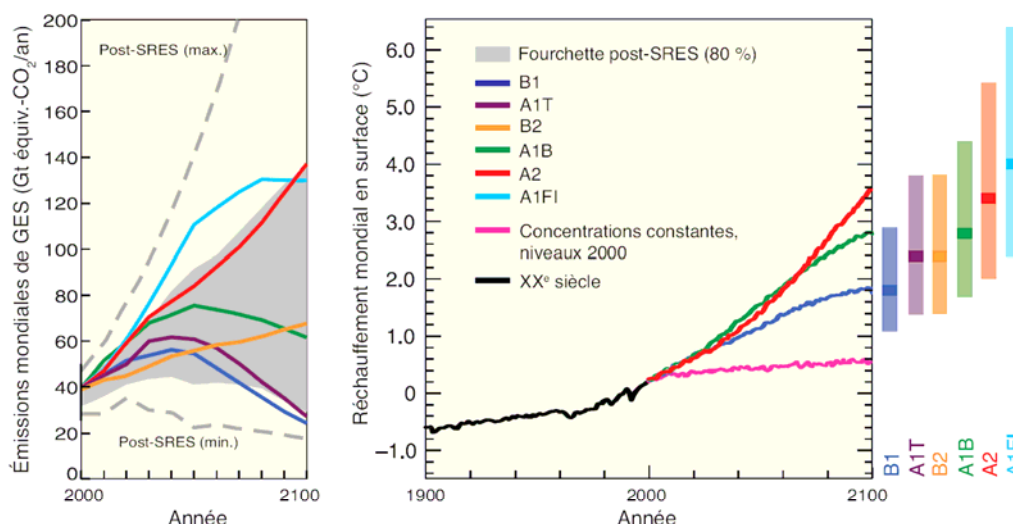


Figure 3.36. Scénarios d'émissions mondiales de GES (CO₂, le CH₄, le N₂O et les gaz fluorés) pour la période 2000–2100 (en l'absence de politiques climatiques additionnelles) et projections relatives aux températures en surface (GIEC, 2007)

⁸³ Tous les écarts de température sont calculés par rapport à 1980-1999.

3.4.1.2. L'évolution des températures d'été en France métropolitaine

La Figure 1.9 présente les résultats de Dusfrene et *al.* (2006) concernant l'évolution de la température moyenne estivale en France métropolitaine. Ces résultats ont été obtenus avec deux modèles de simulation climatique en s'appuyant sur deux des scénarios définis par le GIEC (A2 et B1, présentés dans la partie 3.4.1.1). Les observations de température sont aussi mentionnées, elles font clairement ressortir le côté exceptionnel de l'été 2003. Dans le scénario A2, la température moyenne des étés croît fortement, et, à la fin du siècle, la température de tous les étés simulés dépasse celle de l'été 2003. Pour le scénario B1, si la température des étés augmente plus faiblement, un été de type 2003 n'est plus exceptionnel en 2100.

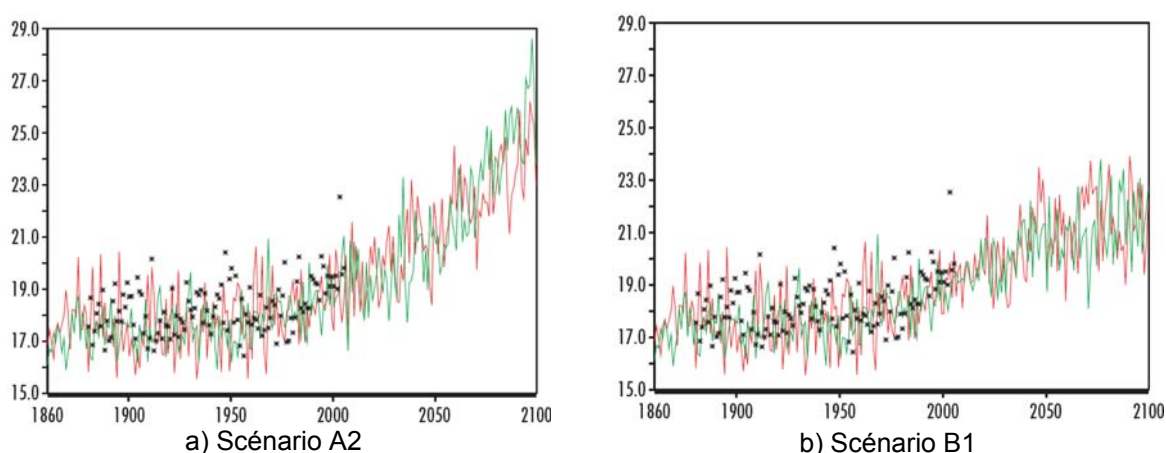


Figure 3.37. Evolution de la température moyenne (°C) durant les trois mois d'été (juin à août) en France métropolitaine ; observée (étoiles noires), et simulée par les modèles du CNRM (en rouge) et de l'IPSL (en vert).

S'il existe une incertitude importante sur la nature des climats à venir et l'amplitude des changements, ces résultats illustrent comment les effets d'un changement climatique global pourraient se traduire à l'échelle régionale. La canicule de 2003 pourrait devenir la norme en France dans quelques décennies.

3.4.1.3. Adaptation et atténuation

Dans un contexte de réchauffement climatique, il apparaît donc nécessaire à la fois de limiter les émissions de GES et de s'adapter à l'évolution prévisible du climat. De nombreux domaines seront en effet affectés par le changement climatique : approvisionnement en eau, agriculture, santé, tourisme... Weckstein et Salagnac (2006) synthétisent les principaux risques contre lesquels le secteur du bâtiment, et de façon générale l'environnement urbain, doit se prémunir. Il s'agit de l'augmentation éventuelle de la fréquence et de l'intensité des événements climatiques (tempêtes, inondations), des sinistres dus aux argiles gonflantes⁸⁴ et de la variation de température ambiante extérieure.

La stratégie française d'adaptation au changement climatique (ONERC, 2007) estime qu'il est urgent de mener des actions préventives dans le domaine du bâtiment et de l'urbanisme pour protéger les populations de la chaleur. Le développement de la climatisation est une des mesures d'adaptation envisageables. Elle s'accompagne cependant d'un accroissement des émissions de GES (directes et indirectes) et de l'augmentation de la demande d'électricité à un moment où les réseaux sont particulièrement fragiles, notamment dans un contexte de réchauffement climatique (refroidissement des centrales). Il faut donc réussir à concilier, d'une part, l'amélioration du confort d'été en général et l'évitement de catastrophes sanitaires, et d'autre part, de limiter les impacts liés à la climatisation.

Dans cette partie, il s'agit d'appréhender les relations entre changement climatique, besoins de refroidissement et confort d'été, puis d'évaluer dans quelle mesure des actions d'amélioration peuvent permettre une réduction des besoins et de l'inconfort dans un contexte de changement climatique.

⁸⁴ Les argiles gonflantes voient leur volume varier avec leur teneur en eau, occasionnant des dommages sur les constructions, notamment en période de sécheresse.

3.4.2 Présentation des fichiers climatiques utilisés

3.4.2.1. Scénario d'émission et régionalisation

Par la suite, nous nous reposerons sur le scénario A2 du GIEC qui aboutit à une augmentation d'environ 3,5 °C de la température globale moyenne annuelle à la surface de la planète, ce qui le situe dans la classe haute des scénarios du GIEC, sans qu'il constitue pour autant un cas extrême.

Pour obtenir des fichiers météorologiques utilisables avec des logiciels de simulation de bâtiments, il est nécessaire de se reposer sur un scénario d'émission et un modèle climatique global puis, d'adapter les résultats, notamment le pas de temps et le format des données météorologiques fournies. L'Université de Southampton a mis au point un outil permettant d'obtenir ce type de fichier intégrant le changement climatique à partir de fichiers climatiques actuels (SERG, 2009). Il repose sur le modèle climatique HadCM3⁸⁵ (Hadley Centre, 2009) et une méthodologie développée par Jentsch et al. (2008). Par la suite, nous avons utilisé cet outil afin de déterminer le climat, à horizon 2050, des différentes villes étudiées.

3.4.2.2. Evolution des climats français retenus dans cette étude

L'évolution des degrés-jours de chauffage et de refroidissement⁸⁶ est présentée sur la Figure 3.38 pour différents climats européens ainsi que pour notre hypothèse d'évolution des climats de Trappes et Nice à l'horizon 2050. En termes de degrés-jours de refroidissement et de chauffage, notre scénario d'évolution climatique aboutit en 2050, pour la ville de Nice, à un climat proche de celui d'Athènes aujourd'hui et, pour la ville de Trappes, à un climat semblable à celui de Madrid aujourd'hui. L'augmentation moyenne des températures sur l'année s'élèverait alors à 2,2 °C pour le climat de Nice et à 3,3 °C pour celui de Trappes. Cependant, comme le montre la Figure 3.39, l'augmentation des températures moyennes mensuelles en 2050 par rapport à 2008 serait plus importante en été (4,1 °C à Nice et 5,7 °C à Trappes) qu'en hiver.

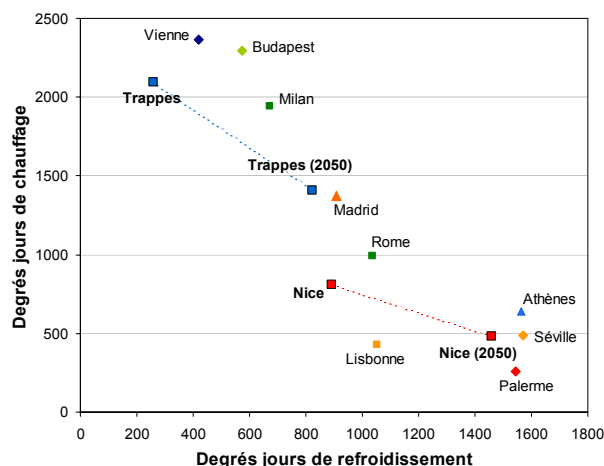


Figure 3.38. Evolution des climats d'ici 2050 en termes de degrés jours de refroidissement et de chauffage

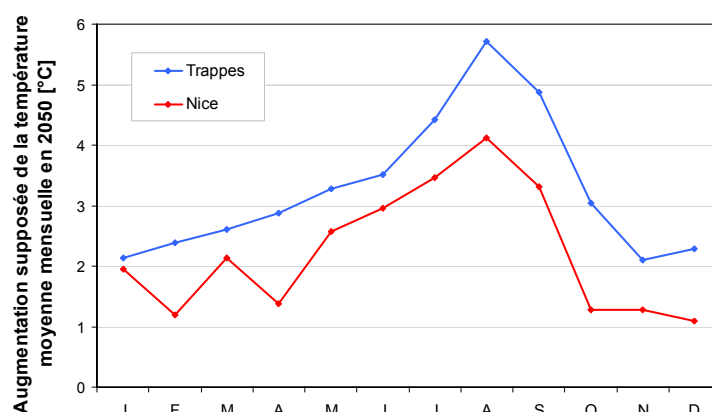


Figure 3.39. Augmentation supposée de la température moyenne mensuelle en 2050 par rapport à 2008

⁸⁵ Ce modèle prévoit une augmentation de la température annuelle mondiale de 3,7 °C en 2100 (scénario A2).

⁸⁶ Le calcul repose sur une température de non refroidissement et de non chauffage de 15 °C.

3.4.3 Impact sur la demande d'énergie et le confort d'été

3.4.3.1. Une augmentation de l'inconfort estival

La Figure 3.40 présente une comparaison entre l'inconfort estival obtenu pour les pièces de bureaux (non rénovées) simulées en ventilation naturelle sous un climat actuel et sous un climat « 2050 ». Avec des températures extérieures plus élevées, le nombre d'heures d'inconfort s'accroît d'un facteur 2 ou d'un facteur 3 et l'augmentation est du même ordre si l'on se base sur les bâtiments de référence mieux isolés.

Si les protections solaires et les systèmes de ventilation permettent une réduction importante de l'inconfort, aucune des pièces, même équipées de ces solutions, ne peut satisfaire le critère de confort que nous avons fixé (part d'heures d'occupation inconfortables inférieure à 3 %).

Dans le secteur résidentiel, la Figure 3.41 présente une comparaison entre l'inconfort estival obtenu pour un climat actuel et celui provoqué par un climat « 2050 ».

Le nombre d'heures d'inconfort s'accroît d'un facteur 2 ou d'un facteur 3 selon les configurations. L'étude des bâtiments de référence mieux isolés aboutit à une augmentation similaire.

Excepté pour le climat de Trappes, l'utilisation de protections solaires et de systèmes de ventilation ne permet pas de satisfaire le critère de confort que nous avons fixé (part d'heures d'occupation inconfortables inférieure à 3 %). Elle permet cependant une forte amélioration du confort puisque les heures inconfortables se voient par exemple réduites d'un facteur 6 dans le cas de Trappes.

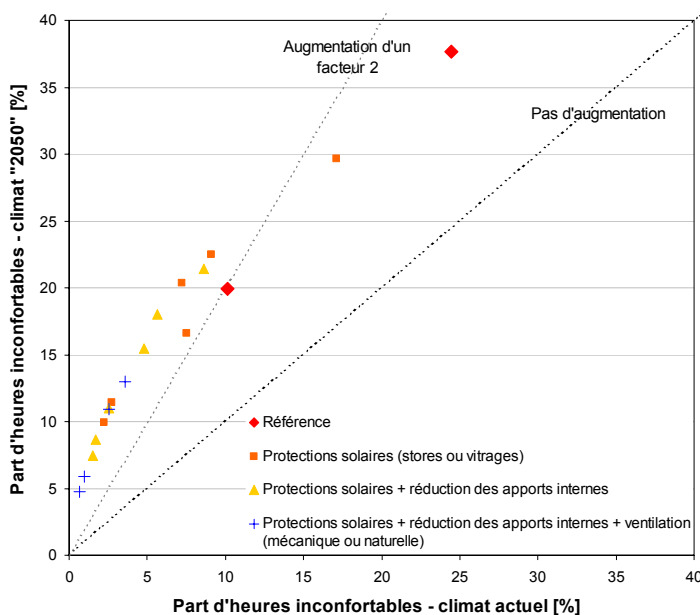


Figure 3.40. Comparaison entre l'inconfort estival régnant dans les pièces de bureaux non rénovées en 2008 et celui obtenu sous un climat « 2050 »

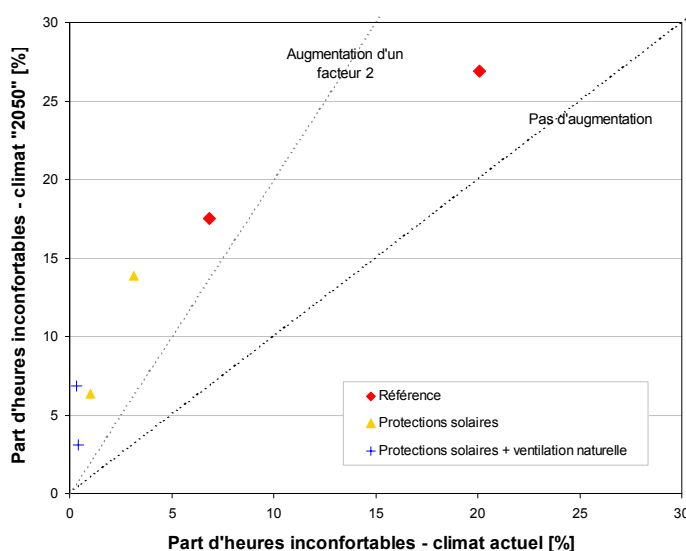


Figure 3.41. Comparaison entre l'inconfort estival régnant dans les pièces de résidence non rénovées en 2008 et celui obtenu sous un climat « 2050 »

3.4.3.2. Une augmentation significative des besoins de refroidissement

La Figure 3.42 présente une comparaison entre les besoins de refroidissement des pièces de bureaux non rénovées en 2008 et ceux obtenus pour un climat « 2050 ». Si les besoins de refroidissement augmentent d'environ 50 %, il reste possible d'atteindre des niveaux de besoin assez faibles en mettant en place une stratégie de réduction des apports de chaleur associée à de la ventilation. Les besoins de refroidissement atteignent alors des niveaux de l'ordre de 15 kWh/m² à Trappes et de 30 kWh/m² à Nice.

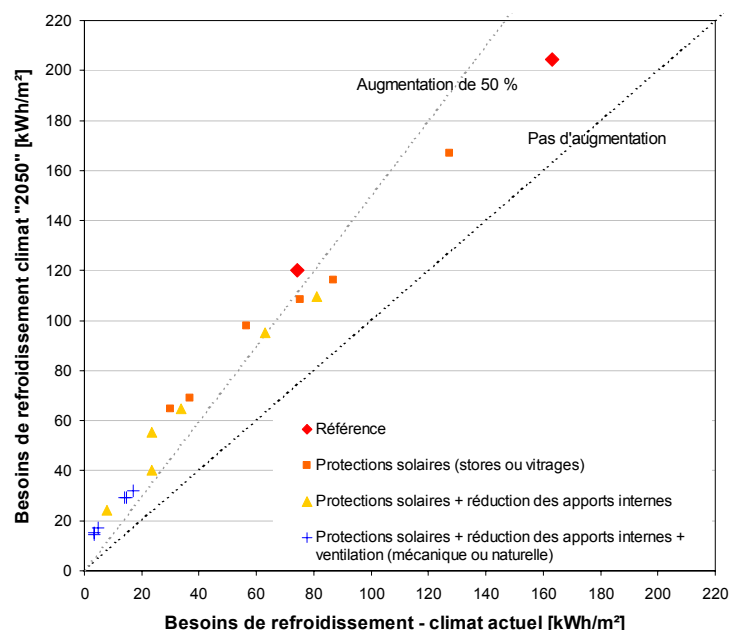


Figure 3.42. Comparaison entre les besoins de refroidissement des pièces de bureaux non rénovées en 2008 et ceux obtenus pour un climat « 2050 »

Les boutiques de référence voient leurs besoins de refroidissement augmenter de 70 % à Trappes et de 50 % environ à Nice. La mise en place de l'ensemble des améliorations du confort d'été étudiées permet de limiter les besoins à 15 kWh/m² à Trappes et 40 kWh/m² à Nice.

En ce qui concerne le résidentiel, les besoins de refroidissement s'accroissent d'un facteur 2 ou d'un facteur 3 selon les configurations. La mise en place de stratégies de réduction des apports de chaleur associées à de la ventilation permet de réduire les besoins de refroidissement à des niveaux de l'ordre de 10 kWh/m² à Trappes et de 23 kWh/m² à Nice.

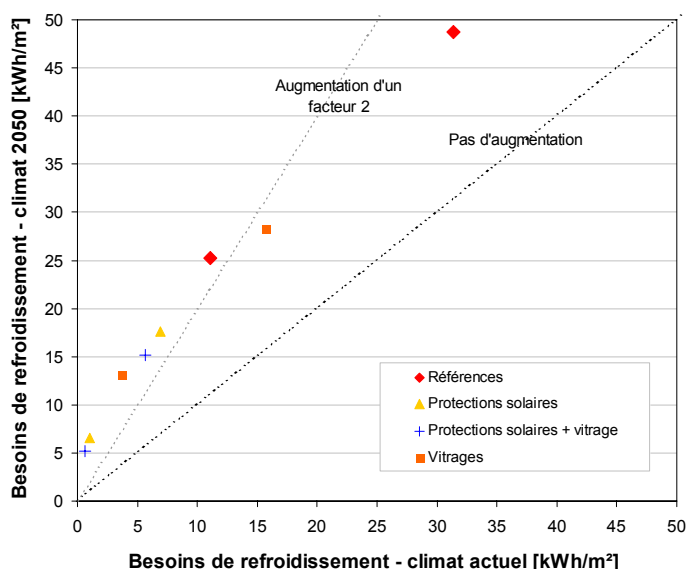


Figure 3.43. Comparaison entre les besoins de refroidissement des pièces de résidence non rénovées en 2008 et ceux obtenus pour un climat « 2050 »

3.4.3.3. Les besoins de chauffage

La Figure 3.44 regroupe les besoins de chauffage des différentes pièces de référence (avec et sans réduction des apports internes liés à l'éclairage) obtenus à partir des climats actuels et « 2050 ». Elle révèle que le changement climatique pourrait engendrer une réduction des besoins de chauffage de l'ordre de 40 %. Il est cependant difficile de prévoir si le bilan entre augmentation des besoins de refroidissement et diminution de ceux de chauffage sera positif. Les grandes inconnues résident dans l'évolution du taux de pénétration de la climatisation (que nous aborderons au chapitre 5) et de l'efficacité des systèmes de chauffage et des enveloppes. Dans son rapport sur les coûts des impacts et les pistes d'adaptation face au changement climatique, l'Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique (2009) estime qu'à équipement de climatisation constant, l'évolution climatique pourrait engendrer un repli de la consommation annuelle du secteur du bâtiment de l'ordre de 2 % à l'horizon 2030. Selon ce même rapport, le développement spontané de la climatisation réduirait ce gain de moitié.

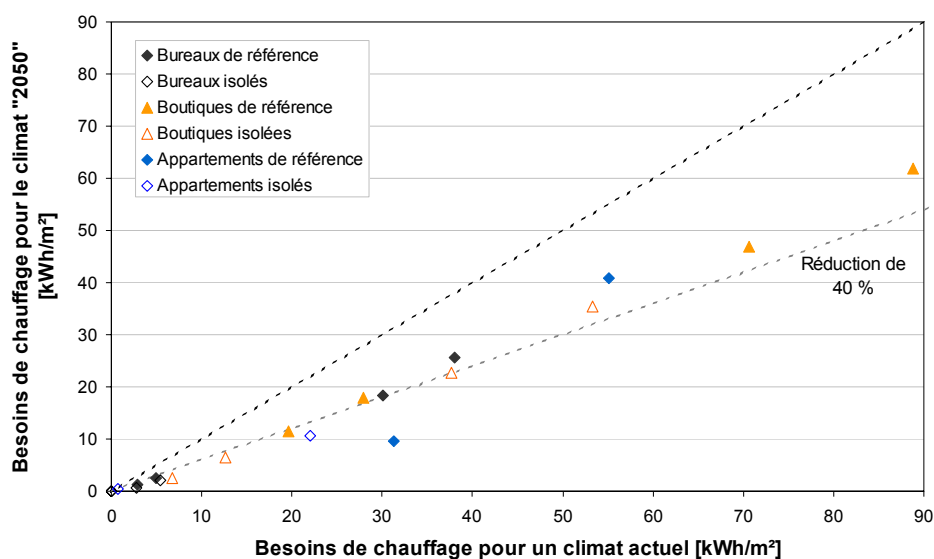


Figure 3.44. Comparaison des besoins de chauffage actuels aux besoins issus des simulations réalisées avec des climats « 2050 »

3.5 Evaluation des coûts généralisés associés aux actions d'amélioration du confort d'été

Dans le présent chapitre, nous avons étudié dans quelle mesure des actions d'enveloppe ou d'usage du bâtiment permettaient de réduire les besoins de refroidissement et l'inconfort estival. Dans cette partie, il s'agit de caractériser ces actions en termes de coût, étape nécessaire à leur comparaison technico-économique réalisée au chapitre 5. Ces coûts concernent en premier lieu les biens marchands (matériel) mais aussi, dans le cas des bâtiments non climatisés, les coûts d'inconfort comme nous l'avons vu au chapitre 1.

3.5.1 Hypothèses de coûts concernant les biens marchands liés à l'amélioration du confort d'été

3.5.1.1. Problématiques liées à l'évaluation des coûts

Il existe une incertitude importante, inhérente aux exercices d'évaluation des coûts. En effet, ces derniers peuvent varier de façon considérable pour des biens remplissant une fonction identique, et ce, en raison de nombreux facteurs tels que la qualité du produit (esthétisme, options, degré de finition...), le bâtiment (difficultés d'installation) ou encore les pratiques de vente et d'achat (réduction promotionnelle, mode de paiement utilisé).

Les coûts établis dans cette partie souffrent donc d'incertitudes importantes mais restent pertinents dans l'objectif d'une comparaison de solutions dans un cadre général. Ils ont été définis dans le contexte français et prennent en compte l'achat des produits, leur installation et leur maintenance. La durée de vie est aussi déterminée, elle sera nécessaire pour effectuer un calcul en coût global.

3.5.1.2. Evaluation du coût des vitrages à faible facteur solaire

Achat et installation

Marchio (2009) a établi les coûts d'achat et d'installation des vitrages (menuiserie comprise) à partir de retours d'appels d'offre. La Figure 3.45 indique les coûts ainsi obtenus pour des vitrages clairs, sans traitement par une couche réfléchissante permettant de réduire le facteur solaire. Les deux nuages de points correspondent à deux familles de menuiseries : bois/PVC (en bleu) et aluminium (en rouge). Le coût de l'installation d'un vitrage sera calculé à l'aide de l'équation (3.4) (Marchio, 2009).

$$C = \left(200 + \frac{400}{U_{baie}} + 50 \cdot (1 - FS) \right) \cdot S_{baie} \quad (3.4)$$

Avec : U_{baie} , le coefficient de déperdition thermique de la baie, S_{baie} , la surface de la baie, FS, le facteur solaire de la baie.

Le surcoût lié à l'application d'un traitement réfléchissant est alors de l'ordre de 50 €/m² et dépend du facteur solaire.

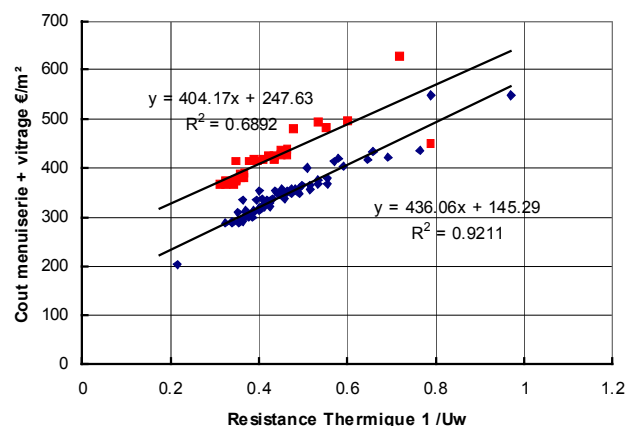


Figure 3.45. Coûts HT de l'installation de vitrages en fonction de la résistance thermique (Marchio, 2009)

Maintenance et durée de vie

Concernant les vitrages, il est supposé qu'aucune opération de maintenance n'est requise. Leur durée de vie est fixée à 30 ans, valeur généralement retenue que ce soit pour des menuiseries bois (CTBA, 2009) ou aluminium (SNFA, 2008).

3.5.1.3. Evaluation du coût des protections solaires

Achat et installation

Dans un contexte français, Marchio (2009) estime le coût d'une protection solaire à 150 € HT par m² indépendamment de la valeur du facteur solaire, mais ne fournit aucune justification basée sur des observations de marché. Des exemples de prix d'achat proposés sur des sites Internet de distributeurs ont été recueillis (Figure 3.46). Les performances des protections étant très rarement précisées, ces coûts sont directement exprimés en fonction de la surface des protections solaires. Nous négligerons le coût de la pose qui ne comporte pas de difficulté particulière, les stores verticaux étant notamment à monter soi-même. Les Figure 3.46 a) et b) montrent que la valeur de 150 €/m² peut être retenue comme représentative du coût pour les deux types de protections solaires. Le coût de la motorisation des stores est à ajouter, il est de l'ordre de 200 € HT⁸⁷ pour un store extérieur vertical et de 300 € HT pour un store banne.

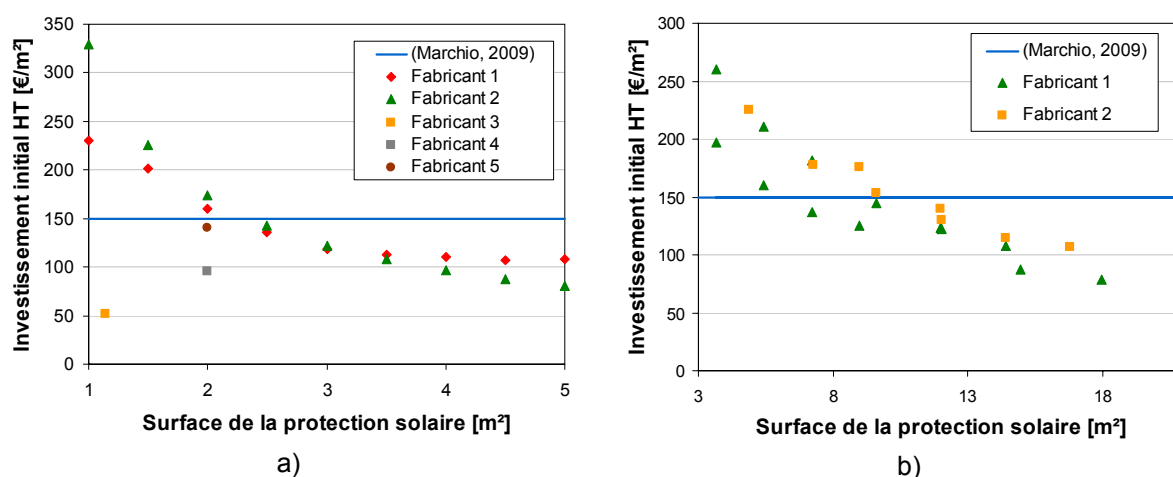


Figure 3.46. Exemples de coûts d'achat de protections solaires verticales (a) et de bannes (b)

Maintenance et durée de vie

Il est supposé qu'aucune opération de maintenance n'est nécessaire et que la durée de vie des protections solaires est de 12 ans.

3.5.1.4. Ventilation naturelle

Marchio (2008) évalue les coûts d'achat et d'installation de systèmes d'ouverture automatique des baies dans les bâtiments de bureaux à 200 € HT par fenêtre. Aucune source supplémentaire n'ayant été trouvée, cette valeur est retenue pour la suite de l'étude. D'autre part, la durée de vie de ce type de produit est arbitrairement fixée à 12 ans et il est supposé qu'aucune opération de maintenance n'est nécessaire.

3.5.1.5. Ventilation mécanique

Les débits à assurer en période de sur-ventilation mécanique sont de 1080 m³/h pour la boutique et de 1458 m³/h pour la pièce de bureau. Comme le montrent les descriptions de produits de ventilation effectuées par Radgen et Oberschmidt (2008) ou par Adnot et al. (2009) dans le cadre d'études sur l'écoconception des ventilateurs résidentiels et non-résidentiels, ces débits peuvent être assurés par un extracteur mural, un extracteur positionné sur le toit ou encore une centrale simple flux.

⁸⁷ 175 € HT par unité dans (Marchio, 2008), l'enquête sur Internet donne des prix HT compris entre 150 et 420 €.

Radgen et Oberschmidt (2008) donnent des ordres de prix TTC de différents types d'extracteur en fonction de la puissance électrique du moteur qui, dans notre cas, est de l'ordre de 0,1 à 0,5 kW (Tableau 3.30). La disparité des prix est importante à la fois entre les catégories de produits et au sein même des catégories. Nous supposons, pour la suite de l'étude, un coût d'achat de 900 € HT.

Tableau 3.30. Ordre de prix pour des appareils de puissance électrique de l'ordre de 0,1 – 0,5 kW

	Prix [€]
Extracteur mural	400 - 800
Extracteur de toit	500 - 2000
Centrale simple flux	500 – 1200

Radgen et Oberschmidt (2008) estiment que les coûts d'installation sont de l'ordre de 50 à 100 % du coût total d'investissement et nous retiendrons ici une valeur de 675 €. Concernant la durée de vie de l'installation, nous nous reposerons sur ces mêmes auteurs qui l'évaluent à 15 ans. Enfin, selon la norme européenne EN 15459 (CEN, 2006), le coût de la maintenance annuelle pour les ventilateurs est typiquement de l'ordre de 4 % de l'investissement initial (incluant les coûts d'installation), valeur que nous retiendrons par la suite en l'absence de sources supplémentaires.

3.5.1.6. Réduction des apports internes par remplacement de l'éclairage

Investissement

Après étude du marché, Marchio (2009) explique qu'en raison de la dispersion des résultats obtenus, aucune relation entre le coût d'une installation d'éclairage et sa performance (puissance installée, efficacité) n'apparaît pertinente. Des paramètres « sans coût » ont en effet une influence significative sur la puissance de l'installation : le choix de couleurs claires plutôt que de couleurs foncées permet par exemple de réduire de 20 % la puissance installée. Nous suivrons les recommandations de Marchio (2009) qui suggère une valeur de 40 € par m² de surface rénovée quelles que soient les performances de l'installation.

Maintenance et durée de vie

Dans le cadre de la directive européenne sur l'écoconception des produits consommant de l'énergie (CE, 2005), une étude préparatoire a été effectuée quant aux systèmes d'éclairage dans les bureaux (Van Tichelen et al., 2007). Selon cette étude, la durée de vie des luminaires et des ballasts s'élève à 20 ans alors que celle des lampes n'est que d'environ 6 ans. Une maintenance est donc nécessaire, de l'ordre de 2,2 €cts par Watt installé et par an (lampe et main d'œuvre). Ces valeurs seront retenues pour la suite de l'étude.

3.5.1.7. Récapitulatif des hypothèses de coût

Les hypothèses de coût définies pour les différentes actions étudiées sont regroupées dans le Tableau 3.31.

Tableau 3.31. Coûts HT des différentes actions étudiées et durée de vie

Actions	Achat	Installation	Maintenance	Durée de vie
Remplacement des vitrages	Equation (3.4)		-	30 ans
Installation de protections solaires	150 € par m ² de protection Motorisation : 200 € pour un store vertical, 300 € pour un store banne		-	12 ans
Installation d'un système de ventilation naturelle	200 € par fenêtre équipée ⁸⁸		-	12 ans
Installation d'un système de ventilation mécanique	900 € par système (une pièce)	675 € par système	63 €/an	15 ans
Remplacement de l'éclairage	40 € par m ² de surface rénovée		2,2 €cts par Watt installé et par an	20 ans

⁸⁸ Par la suite, nous supposons que les pièces de bureaux sont équipées de 11 fenêtres (de 2 m² environ).

3.5.2 Evaluation des coûts d'inconfort

3.5.2.1. Ordre de grandeur des coûts d'inconfort thermique

Au chapitre 2, nous avons développé une méthode de monétisation de l'inconfort thermique et estimé le coût d'inconfort à 60 €cts par degré-heure d'inconfort et par occupant. Directement liés aux conditions climatiques intérieures, les coûts d'inconfort dépendent du type de bâtiment, de la zone climatique et des actions ayant été mises en place pour améliorer le confort d'été.

Les coûts d'inconfort sont présentés Figure 3.47 pour les bureaux non rénovés et pour un climat actuel. Ils varient d'environ 20 €/m²/an (Trappes) à 60 €/m²/an (Nice). La mise en place de protections solaires engendre un gain de 18 €/m²/an à Trappes et de 50 €/m²/an à Nice par rapport à la pièce de référence. En associant des stratégies de réduction des apports internes et extérieurs à de la ventilation (Pack 4 et Pack 6), les coûts d'inconfort sont réduits à moins de 3 €/m²/an.

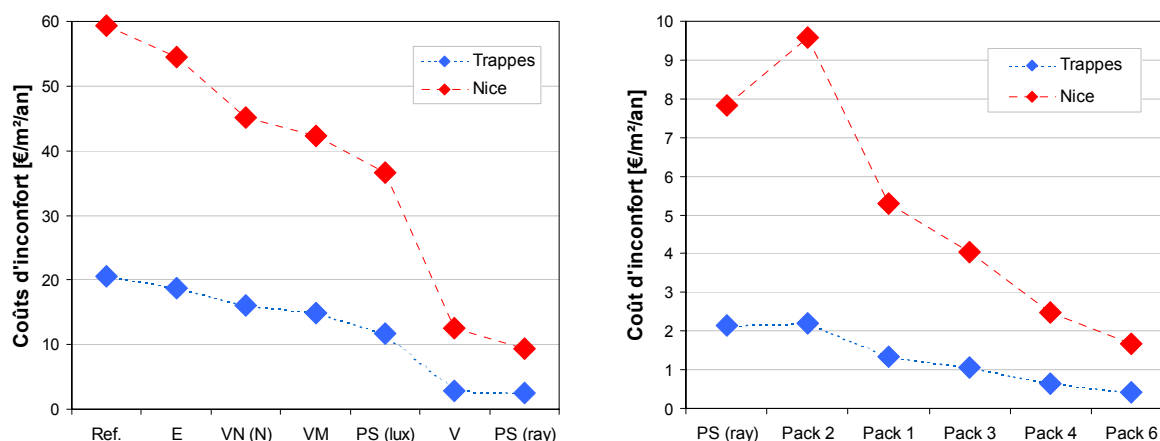


Figure 3.47. Coûts d'inconfort thermique dans les bureaux en fonction des actions ou ensembles d'actions d'amélioration du confort d'été mises en place.

En ce qui concerne la boutique, ces coûts sont très élevés (Figure 3.48) en raison d'un inconfort très important (d'autant plus qu'il est évalué en fonction de la zone de confort analytique et non en fonction de la zone de confort adaptative), mais aussi d'une forte densité d'occupation. Ils varient ainsi d'environ 540 €/m²/an (Trappes) à 1460 €/m²/an (Nice) pour le cas de référence et peuvent être réduits à 20 €/m²/an (Trappes) et 125 €/m²/an (Nice) dans le cas d'une lutte ambitieuse contre l'inconfort d'été (Pack 4). Si ces coûts d'inconfort sont élevés, les gains obtenus en mettant en place des mesures d'amélioration du confort d'été le sont également. L'installation d'une protection solaire sera par exemple à l'origine d'un bénéfice, par rapport au cas de référence, de 320 €/m²/an à Trappes et de 690 €/m²/an à Nice.

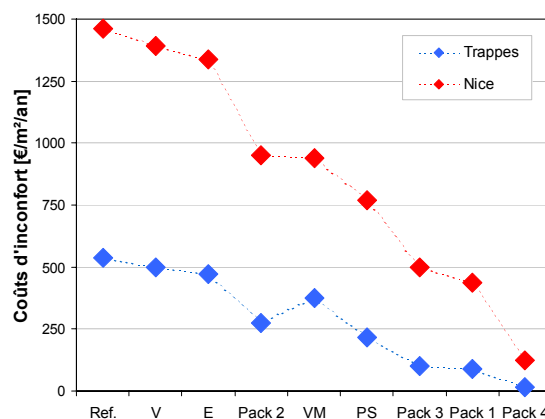


Figure 3.48. Coûts d'inconfort thermique dans la boutique en fonction des actions d'amélioration du confort d'été mises en place.

Si les coûts d'inconfort dans la pièce de résidence de référence sont du même ordre que ceux de la pièce de bureaux (15 €/m²/an à Trappes et 60 €/m²/an à Nice), ils sont très fortement réduits à partir du moment où une action d'amélioration du confort d'été a été mise en place (Figure 3.49).

Ainsi, quel que soit le climat, une gestion appropriée des protections solaires est une condition suffisante pour réduire les coûts d'inconfort à moins de 3 €/m²/an (Figure 3.49). Si l'on y ajoute une stratégie de ventilation naturelle nocturne, alors les coûts d'inconfort deviennent inférieurs à 30 €/m²/an.

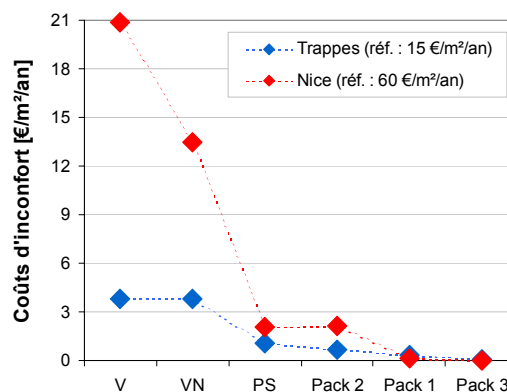


Figure 3.49. Coûts d'inconfort thermique dans la pièce de résidence en fonction des actions d'amélioration du confort d'été mises en place.

Le Tableau 3.32 rassemble, pour les différents bâtiments et climats, les coûts d'inconfort des pièces de référence ainsi que les coûts minimaux pouvant être atteints en appliquant des actions d'amélioration du confort d'été. Comme l'on pouvait s'y attendre, les coûts d'inconfort sont beaucoup plus élevés dans l'hypothèse d'un réchauffement climatique, ils sont ainsi multipliés d'un facteur 2 à 5 dans les bâtiments de référence.

Tableau 3.32. Coûts d'inconfort pour les différents bâtiments et climats

		Coûts d'inconfort [€/m ² /an]			
		Climat actuel		Climat 2050	
		Référence	Coût minimal	Référence	Coût minimal
Bureaux	Trappes	21	1	79	11
	Nice	59	2	140	22
Boutique	Trappes	538	17	1200	136
	Nice	1462	123	2255	466
Appartement	Trappes	15	0	75	4
	Nice	59	0	124	10

3.5.2.2. L'importance des coûts d'inconfort dans les bilans économiques

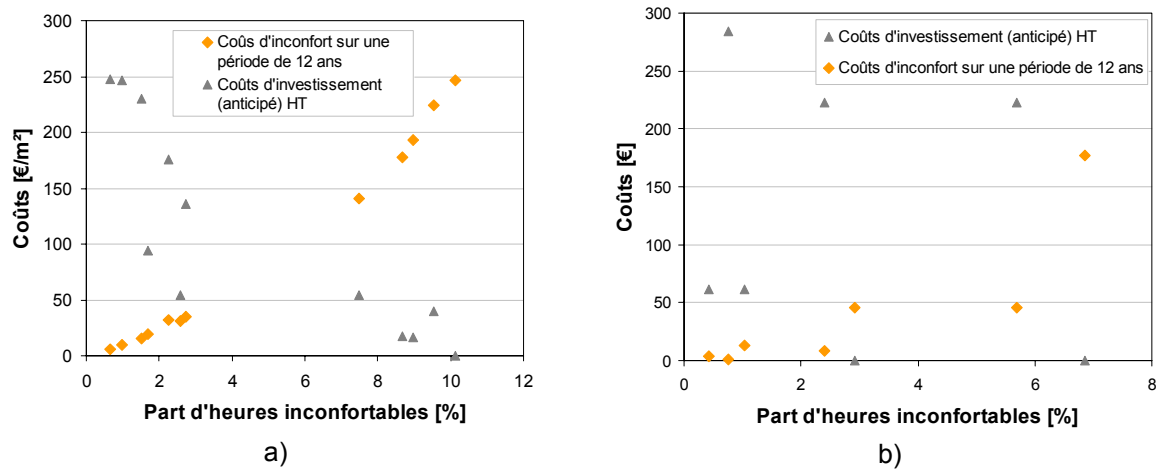
Afin de mieux percevoir l'importance que peut jouer la prise en compte des coûts d'inconfort dans les bilans économiques des différentes solutions d'amélioration du confort d'été, nous les comparons ici aux coûts d'investissement définis en partie 3.5.1.

Dans le cas d'équipement déjà existants dans les bâtiments (vitrage, éclairage), une distinction est généralement réalisée entre les investissements anticipés, qui ne sont pas liés à l'obsolescence des équipements, et les remplacements programmés, lorsque l'équipement aurait été remplacé de toute façon. Dans ce dernier cas, le coût de l'action de remplacement est en fait le surcoût de cette action par rapport à celle qui aurait été menée normalement. Nous considérerons ici que l'on a uniquement affaire à des investissements anticipés et la valeur de ces derniers peut donc être surestimée dans certains cas.

La Figure 3.50 présente les coûts d'investissement et les coûts d'inconfort (sommés sur une période de 12 ans) en fonction de la part d'heures d'occupation inconfortables dans la pièce de bureau (a) et dans l'appartement (b) à Trappes. De façon générale, si l'on fait abstraction des mesures comportementales dans le secteur résidentiel (ventilation nocturne) qui ont un coût nul, les efforts entrepris pour réduire l'inconfort se traduisent par une augmentation des coûts d'investissement et une réduction des coûts d'inconfort.

Cette comparaison des coûts d'investissement et d'inconfort dans le cas du climat de Trappes, met en évidence le fait que les ordres de grandeurs sont similaires et que les coûts d'inconfort auront une importance significative dans les bilans économiques des solutions d'amélioration du confort d'été.

Cette influence sera encore plus manifeste dans le cas de climats aux étés plus chauds et dans l'hypothèse d'un réchauffement climatique.



Il est d'ores et déjà possible de comparer les coûts et bénéfices de certaines actions appliquées aux bâtiments non climatisés. Le Tableau 3.33 présente les coûts et bénéfices des actions de mise en place de la ventilation naturelle nocturne et de protections solaires dans les bureaux par rapport au bâtiment de référence. Le bilan est positif, justifiant le recours à ces actions, et serait encore meilleur dans le cas de climats aux étés plus marqués.

Tableau 3.33. Estimation des coûts et bénéfices engendrés par la mise en place des actions de ventilation naturelle et de protections solaires dans le cas du bureau à Trappes

	Coûts d'inconfort sommés sur 12 ans [€/m²]	Coûts d'investissement [€/m²]	Bénéfices [€/m²]	Coûts [€/m²]
Référence	247	0	-	-
Ventilation naturelle	31	54	216	54
Protections solaires	193	17	54	17
Ventilation naturelle + Protections solaires	2	71	245	71

Les coûts d'inconfort, qui sont du même ordre de grandeur que les coûts d'investissement, auront une influence significative dans les bilans économiques des solutions d'amélioration du confort d'été. A titre d'exemple, nous avons montré que la prise en compte des coûts d'inconfort dans la pièce de bureau non climatisée justifiait économiquement un investissement dans des protections solaires ou des systèmes de ventilation naturelle nocturne. Tout en restant conscient des incertitudes qui pèsent sur la monétisation de l'inconfort, il apparaît nécessaire de prendre en compte ces coûts d'inconfort pour comparer équitablement les différentes options d'amélioration du confort d'été.

3.5.2.3. Ordre de grandeur des coûts d'inconfort sonore dans les bâtiments non climatisés

Une méthode de monétisation, définie au chapitre 2, relie les coûts d'inconfort sonore aux bruits provenant de l'environnement extérieur. Nous considérerons ici que cette méthode s'applique aux bâtiments de référence non climatisés et qu'au contraire, le coût des nuisances sonores est nul dans les bâtiments climatisés pour lesquels l'ouverture des fenêtres est impossible. Ceci nous permettra d'estimer le surcoût du recours à la ventilation naturelle en fonction de l'environnement extérieur et d'évaluer, par la suite, dans quelle mesure l'inconfort sonore peut conduire à choisir une solution de climatisation.

La méthode de monétisation appliquée aux pièces de référence aboutit aux résultats présentés dans le Tableau 2.9. Les coûts d'inconfort sonore varient de 3 €/m²/an à 30 €/m²/an. Ils sont du même ordre que les coûts d'inconfort thermique, et peuvent avoir un impact significatif dans le cas de bruits extérieurs importants. Nous verrons au chapitre 5 dans quelle mesure ils peuvent influencer sur le choix d'une climatisation.

Tableau 3.34. Coûts des nuisances sonores dans les bâtiments permettant l'ouverture des fenêtres

Bruits extérieurs	dB(A)	Coûts [€/m ² /an]	
		Pièce de bureau	Pièce de résidence
Bruits minimaux le jour dans la rue	45	0	0
Rue très tranquille	50	0	0
Rue résidentielle	60	3	4
Circulation importante	70	9	11
Circulation intense	85	17	22
Rue à trafic intense	95	23	30

3.6 Conclusions et premières recommandations

Dans le présent chapitre, les potentiels d'actions d'amélioration du confort d'été portant sur l'enveloppe et l'usage des bâtiments ont été quantifiés en termes de réduction des besoins de refroidissement dans les locaux climatisés, et d'amélioration du confort estival dans les locaux non climatisés⁸⁹.

L'impact, sur ces résultats, des rénovations d'enveloppe et du changement climatique a ensuite été étudié et nous amène à exprimer de premières recommandations :

- La rénovation de l'enveloppe des bâtiments, nécessaire dans le but de réduire les consommations de chauffage, peut détériorer de façon importante le confort d'été et doit donc s'accompagner d'une stratégie efficace de lutte contre l'inconfort estival. Des outils d'aide à la conception ou à la rénovation doivent permettre d'intégrer des solutions de confort d'été et notamment la ventilation naturelle qui ne peut plus être négligée ou traitée grossièrement. Une mauvaise prise en compte du confort d'été au moment de la conception ou de la rénovation peut mener à l'installation, après coup, d'appareils de climatisation qui auraient pu être évités.
- La perspective du changement climatique nécessite des actions cohérentes permettant d'adapter le parc bâti à des températures plus élevées tout en réduisant sa contribution aux émissions de gaz à effet de serre. Ceci implique que les opérations de rénovation et de construction ne soient pas uniquement basées sur les climats passés, mais aussi sur les évolutions attendues pendant le cycle de vie du bâtiment. Des outils d'aide à la conception ou à la rénovation permettant d'intégrer des fichiers climatiques extrêmes devraient être développés et utilisés.

⁸⁹ Un travail similaire a par ailleurs été réalisé dans un contexte européen (Grignon-Massé, Marchio, Da Silva et al., 2009). Des mesures d'amélioration du confort d'été y sont étudiées pour les climats de Palerme, Lisbonne, Milan, Paris et Stockholm, à la fois dans les secteurs résidentiel et tertiaire.

Chapitre 4. Evaluation des performances environnementales des climatiseurs individuels et perspectives d'amélioration

Tables des matières

<u>CHAPITRE 4. EVALUATION DES PERFORMANCES ENVIRONNEMENTALES DES CLIMATISEURS INDIVIDUELS ET PERSPECTIVES D'AMELIORATION</u>	149
TABLES DES MATIERES	151
INTRODUCTION	153
4.1 DEVELOPPEMENT D'UNE METHODE DE CARACTERISATION DES PERFORMANCES ENERGETIQUES DES APPAREILS	155
4.1.1 EVOLUTION SAISONNIERE DES PERFORMANCES ENERGETIQUES	155
4.1.2 DETERMINATION D'INDICES DE PERFORMANCES SAISONNIERES EN MODE REFROIDISSEMENT (SEER) ET EN MODE CHAUFFAGE (SCOP)	161
4.2 ANALYSE DU CYCLE DE VIE DES CLIMATISEURS INDIVIDUELS	175
4.2.1 DETERMINATION ET SPECIFICATION DES APPAREILS DE REFERENCE	175
4.2.2 COLLECTE DES DONNEES NECESSAIRES A L'ACV	178
4.2.3 IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES CAS DE REFERENCE	182
4.2.4 CONCLUSIONS : POTENTIELS D'AMELIORATION IDENTIFIES	185
4.3 PERSPECTIVES D'AMELIORATION DES PERFORMANCES ENVIRONNEMENTALES DES APPAREILS	186
4.3.1 DETERMINATION DES COUTS ASSOCIES AUX CAS DE REFERENCE	186
4.3.2 AMELIORATION DE L'EFFICACITE ENERGETIQUE DES CLIMATISEURS : PERSPECTIVES D'EVOLUTION DES INDICES DE PERFORMANCES SAISONNIERES	187
4.3.3 REDUCTION DES IMPACTS LIES AU CYCLE DE VIE DES FLUIDES FRIGORIGENES	190
4.4 CONCLUSION : RETOUR SUR LE TRAVAIL PRESENTE DANS CE CHAPITRE ET SUR SON CONTEXTE GENERAL	192

Introduction

Dans ce travail de thèse, nous avons décidé d'étudier séparément, d'une part, les actions portant sur l'enveloppe et l'usage des bâtiments (chapitre 3), et d'autre part, les appareils de climatisation (chapitre 4). Les résultats obtenus seront ensuite rassemblés au chapitre 5 dans le but de réaliser une analyse technico-économique des différentes options permettant d'améliorer le confort d'été.

L'objectif général du présent chapitre est d'évaluer les potentiels d'amélioration des performances environnementales des climatiseurs individuels, et les surcoûts qui sont associés à ces améliorations. Pour ce faire, nous avons choisi de nous placer dans une logique de cycle de vie afin de tenir compte des fuites de frigorigène (usage et fin de vie) qui peuvent représenter une part significative des émissions de GES.

Afin de réaliser l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) des climatiseurs, nous devons, dans un premier temps, déterminer la consommation d'électricité des appareils en fonctionnement. Ceci nécessite la création d'une méthode de caractérisation de l'efficacité énergétique moyenne des appareils, prenant en compte leur comportement en fonctionnement non nominal. D'autre part, l'étude des appareils de climatisation étant découplée de l'étude de l'enveloppe et des usages du bâtiment, nous avons décidé au chapitre 1 que cette méthode devait permettre de calculer les consommations électriques des climatiseurs à partir des besoins de refroidissement d'un bâtiment (ou de chauffage dans le cas du mode de fonctionnement réversible).

Une fois ce travail effectué, la réalisation de l'ACV des climatiseurs nous permettra d'évaluer leur impact en termes de consommations d'énergie et d'émissions de GES. Des voies de réduction de ces impacts pourront alors être identifiées.

Enfin, nous devons quantifier les potentiels d'amélioration des performances environnementales des appareils. Des actions d'amélioration des climatiseurs seront évaluées en termes de réduction des émissions de GES et de diminution des consommations énergétiques, mais aussi en termes de surcoûts.

4.1 Développement d'une méthode de caractérisation des performances énergétiques des appareils

4.1.1 Evolution saisonnière des performances énergétiques

4.1.1.1. Les différents modes d'opération des appareils

Terminologie adoptée pour décrire les différents modes d'opération

La terminologie retenue pour décrire les différents modes d'opération des climatiseurs individuels est présentée ci-après et synthétisée Figure 4.1.

Le mode « actif » correspond aux heures pendant lesquelles le compresseur de l'appareil fonctionne ; de l'énergie est alors effectivement extraite du local à climatiser (ou fournie au local en mode chauffage). Dans la pratique, le mode actif est généralement constitué de phases pendant lesquelles le compresseur fonctionne et d'autres pendant lesquelles celui-ci est arrêté. Ce phénomène, dit de cyclage est abordé dans la partie 4.1.1.2.

Le mode « veille active » correspond aux heures pendant lesquelles l'appareil est opérationnel mais les besoins de refroidissement ou de chauffage sont nuls.

Le mode « veille passive » correspond aux heures pendant lesquelles l'appareil n'est pas opérationnel mais peut être réactivé par l'intermédiaire d'une télécommande ou d'un minuteur.

Le mode « éteint » correspond aux heures pendant lesquelles l'appareil a été débranché par l'utilisateur, et ne peut être réactivé ni par minuteur, ni par télécommande.

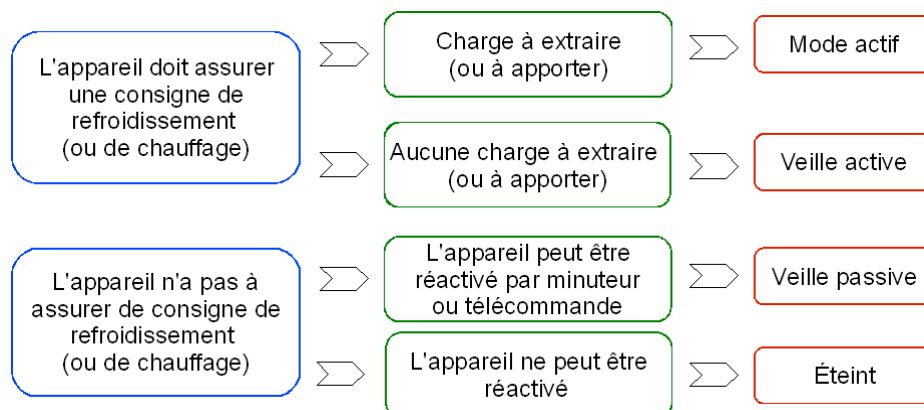


Figure 4.1. Terminologie adoptée pour décrire les différents modes d'opération des appareils

Les sources de consommation d'énergie lorsque l'appareil est éteint ou en veille

Les performances des appareils en mode actif étant abordées dans la partie 4.1.1.2, nous nous concentrons ici sur les consommations liées aux autres modes d'opération.

- Les consommations d'énergie liées à la résistance de carter

Le carter du compresseur est l'endroit où se trouve l'huile du compresseur. Afin d'éviter la condensation de fluide frigorigène dans le compresseur et son absorption par l'huile, il est parfois nécessaire de réchauffer celle-ci. L'élévation de la température de l'huile permet alors au fluide frigorigène dilué de se vaporiser et, ainsi, de ne pas détériorer la lubrification. C'est pour cette raison que les compresseurs sont parfois équipés d'une résistance chauffante, dite résistance de carter.

Une étude a été menée en Australie et en Nouvelle Zélande sur les consommations de veille de certains appareils résidentiels, et notamment sur les climatiseurs (MCE, 2006). La puissance consommée par la résistance de carter apparaît être de l'ordre de 30 à 90 W et cette dernière fonctionne de façon continue sur la majorité des modèles, sauf lorsque ceux-ci sont en mode « actif ».

Toutefois, il existe des résistances dont la puissance fournie est contrôlée en fonction de la température extérieure, diminuant ainsi la consommation de cet usage.

- Les consommations d'énergie en mode « veille active »

En mode « veille active », l'appareil consomme de l'énergie pour alimenter les dispositifs de commande (minuterie, calculateur...) ainsi que pour le fonctionnement du ventilateur intérieur. Les consommations d'énergie pour ce mode sont ainsi de l'ordre de 35 à 65 W d'après Rivière et *al.* (2009).

- Les consommations d'énergie en mode « veille passive »

En mode « veille passive », les climatiseurs consomment de l'électricité pour assurer le fonctionnement des horloges, des minuteries, des touches, ou pour recevoir des signaux provenant de télécommandes. Les puissances généralement observées en « veille passive » sont de l'ordre de 0,2 W à 10 W sans prendre en compte la résistance de carter (MCE, 2006).

- Les consommations d'énergie en mode « éteint »

Lorsque l'utilisateur a débranché l'unité intérieure, l'unité extérieure reste quant à elle généralement branchée et peut consommer de l'énergie (pour le contrôle de la résistance de carter par exemple). Les puissances généralement rencontrées en mode « éteint » sont de l'ordre de 0 W à 5 W sans prendre en compte la résistance de carter (MCE, 2006).

4.1.1.2. Etude des performances énergétiques des appareils en mode actif

Evaluation normative des performances des climatiseurs européens

Les procédures normatives d'évaluation des performances des climatiseurs individuels européens de type air/air sont décrites dans la norme internationale ISO 5151 (ISO, 2005) et la norme européenne EN 14511 (CEN, 2004).

Dans ces normes, l'indice de performance d'un appareil en mode refroidissement est un coefficient, l'EER (Energy Efficiency Ratio), défini comme le rapport entre la puissance frigorifique extraite de la pièce (P_f) et la puissance électrique consommée par l'appareil (P_e) (équation (4.1)).

$$EER = \frac{P_f}{P_e} \quad (4.1)$$

De même, il existe un coefficient semblable pour le mode chauffage, le COP (Coefficient of Performance), défini comme le rapport entre la puissance calorifique délivrée dans la pièce (P_c) et la puissance électrique consommée par l'appareil (P_e) (équation (4.2)).

$$COP = \frac{P_c}{P_e} \quad (4.2)$$

La puissance électrique moyenne absorbée par l'appareil pendant l'intervalle de temps défini par la norme comprend, la puissance absorbée pour le fonctionnement du compresseur, la puissance absorbée par tous les dispositifs de commande et de sécurité de l'appareil, et la quote-part de puissance des dispositifs (par exemple : ventilateurs, pompes) assurant la circulation des fluides caloporteurs à l'intérieur de l'appareil.

La norme EN 14511 stipule que les puissances calorifiques et frigorifiques peuvent être calculées par la méthode enthalpique⁹⁰ ou par l'utilisation de chambres calorimétriques⁹¹.

⁹⁰ La puissance totale de refroidissement (ou de chauffage) de l'appareil est déterminée à partir des mesures de la température et de l'humidité à l'entrée et à la sortie de l'unité, et de la mesure du débit d'air traité.

⁹¹ Les deux pièces de la cellule-test simulent les environnements intérieurs et extérieurs. La température et l'humidité y sont maintenues constantes par des systèmes calibrés sur lesquels des mesures sont effectuées. La puissance frigorifique (ou calorifique) n'est donc pas mesurée directement : la charge sensible est égale à la capacité de chauffage (ou de refroidissement) du système de compensation, la charge latente est obtenue par mesure de la quantité d'eau condensée.

Les puissances calorifiques et frigorifiques, ainsi que la puissance électrique absorbée, sont mesurées à pleine charge, dans les conditions d'essai standardisées indiquées dans le Tableau 4.1. Les performances ainsi évaluées sont qualifiées de performances nominales.

Tableau 4.1. Conditions d'essais selon la norme EN 14511 (CEN, 2004) pour les climatiseurs air/air.

	Échangeur thermique extérieur		Échangeur thermique intérieur	
	Température sèche à l'entrée [°C]	Température humide à l'entrée [°C]	Température sèche à l'entrée [°C]	Température humide à l'entrée [°C]
Mode chauffage	7	6	20	15 max
Mode refroidissement	35	24 ⁹²	27	19

Evolution des performances en mode refroidissement en fonction des températures intérieures et extérieures

Le coefficient de performance d'une machine frigorifique ditherme réelle ($EER_{réel}$) est inférieur à celui d'une machine frigorifique thermodynamiquement idéale ($EER_{idéal}$). Comme indiqué par l'équation (4.3), l'efficacité énergétique de l'appareil idéal décroît lorsque la température de la source froide (le local à refroidir) diminue et que celle de la source chaude augmente (l'environnement extérieur). Il en est de même pour les systèmes réels. D'autre part, on constate de façon empirique que plus la température extérieure est élevée, plus la quantité de chaleur pouvant être extraite du local par la machine frigorifique est réduite.

$$EER_{idéal} = \frac{T_f}{T_c - T_f} \quad (4.3)$$

Avec : T_f : température de la source froide [K]

T_c : température de la source chaude [K]

L'évolution de l'efficacité et de la puissance à pleine charge en fonction des températures intérieures et extérieures dépend de nombreux paramètres de conception tels que, le type de fluide frigorigène, l'efficacité des échangeurs, ou la courbe de performance du compresseur (le changement des températures entraîne un changement du taux de compression du compresseur). A titre d'exemple, Henderson (2001) a étudié l'évolution des performances à pleine charge de climatiseurs air/air et a déterminé des lois simplifiées en fonction des types de compresseur et de détendeurs. La Figure 4.2 présente ces lois pour deux climatiseurs ayant un même détendeur thermostatique mais deux compresseurs différents (à piston et à spiral) ; l'EER et la puissance frigorifique y sont normalisées aux conditions de test de la norme EN 14511 (Tableau 4.1). Selon cette étude, l'EER et la puissance frigorifique à pleine charge décroissent linéairement lorsque la température extérieure augmente, la pente dépendant des caractéristiques de l'appareil. L'EER est ainsi de 30 à 40 % plus élevé à 20 °C de température extérieure qu'à 35 °C. De même, la puissance frigorifique à pleine charge est de 10 à 20 % plus élevée à 20 °C de température extérieure qu'à 35 °C.

⁹² Il n'est pas nécessaire de maintenir la condition de température humide pour les appareils qui n'évaporent pas les condensats.

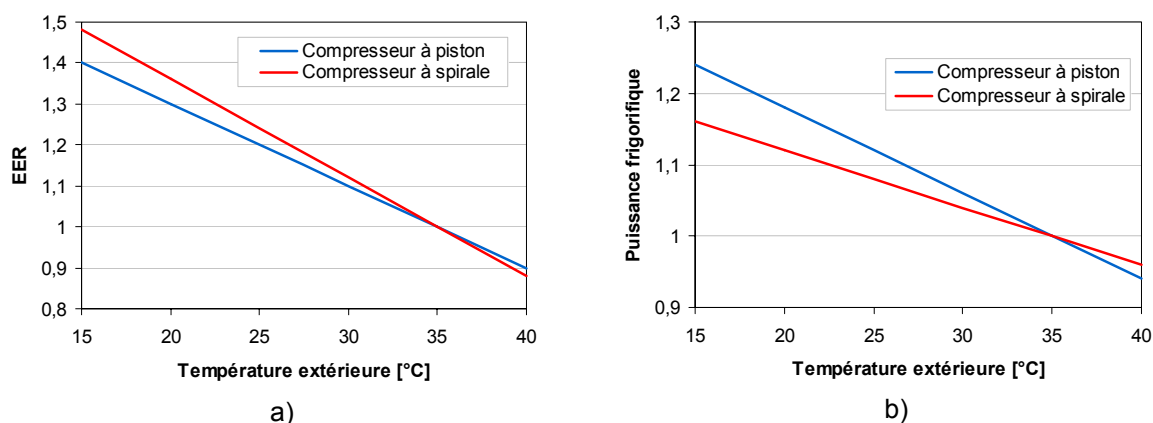


Figure 4.2. Exemples d'évolution de l'EER (a) et de la puissance frigorifique (b) en fonction de la température extérieure (température intérieure : 27 °C) et du type de compresseur (Henderson, 2001)

Evolution des performances en mode chauffage en fonction de la température extérieure et de l'humidité

De façon générale, en mode chauffage, le COP et la puissance calorifique s'accroissent lorsque la température de la source froide, l'air extérieur, augmente. A l'impact des températures de sources s'ajoute le phénomène de givrage. Selon les caractéristiques de l'appareil et l'humidité contenue dans l'air, le givre peut s'accumuler sur l'échangeur extérieur lorsque la température extérieure devient inférieure à un seuil de température de l'ordre de 3 °C à 7 °C. Un dégivrage est dès lors nécessaire. Il consiste à inverser le trajet du liquide frigorigène dans le circuit de sorte que le gaz chaud fasse fondre la glace au niveau des ailettes de l'évaporateur. Ceci s'accompagne d'une dégradation du COP et de la puissance calorifique pouvant être fournie par l'appareil car l'inversion du cycle implique que la chaleur nécessaire au dégivrage soit prélevée dans le local. Plus l'humidité de l'air est élevée, plus le phénomène de givrage est important et plus les performances s'en trouvent impactées.

A titre d'exemple, la Figure 4.3 présente l'évolution du COP et de la puissance calorifique de 2 pompes à chaleur air/air de petite puissance pour 4 températures extérieures. Ces données proviennent de tests réalisés sur 26 appareils par l'institut national suédois d'essais et de recherche (SP, 2009). Entre 7 °C et 2 °C, le COP chute de 2 % et 3,8 % par degré Celsius, la puissance frigorifique de 3 % et 6,4 %. La diminution des performances est ensuite plus faible entre 2 °C et -15 °C : 1 % et 0,6 % par degré Celsius pour le COP, 1,3 % et 0,7 % par degré Celsius pour la puissance frigorifique. La chute importante des performances entre 7 °C et 2 °C est due au phénomène de dégivrage.

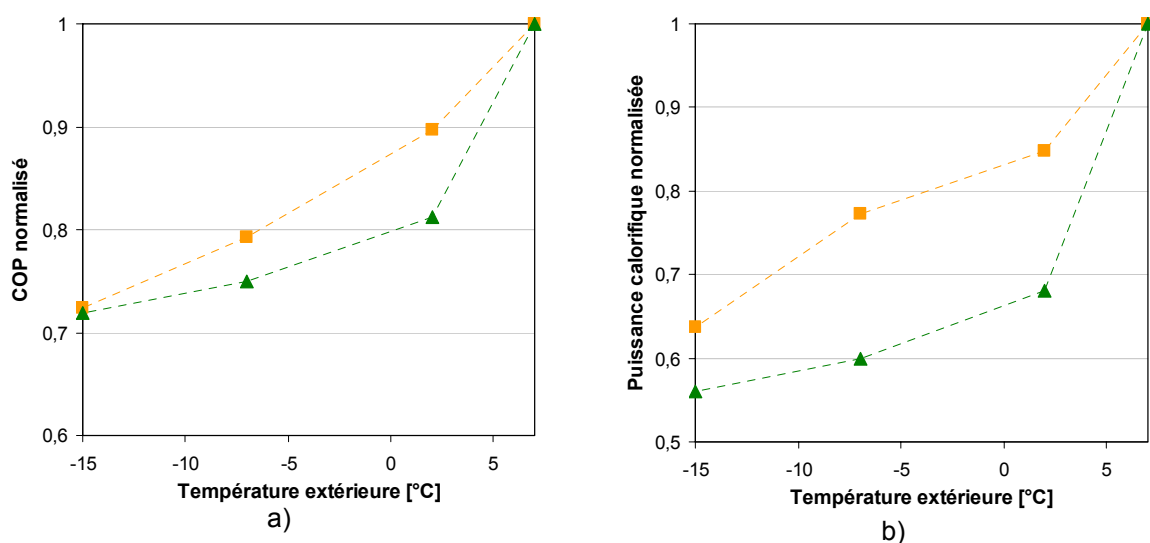


Figure 4.3. Exemples d'évolution de COP (a) et de la puissance calorifique (b) en fonction de la température extérieure pour 4 pompes à chaleur air/air (SP, 2009)

Evolution des performances en fonction de la charge thermique à extraire ou à apporter

Afin d'assurer des conditions intérieures confortables aux périodes les plus chaudes, les climatiseurs sont dimensionnés pour pouvoir assurer l'extraction de charges thermiques importantes survenant quelques heures dans l'année. Aussi, pendant l'essentiel du temps de fonctionnement, l'appareil doit extraire des charges thermiques plus faibles et inférieures à sa puissance frigorifique maximale, il fonctionne alors à charge partielle.

Le taux de charge est défini comme le ratio entre la puissance à extraire (ou à apporter) par l'appareil et la puissance frigorifique (ou calorifique) maximale de l'appareil à ce même instant, pour le même jeu de températures de sources. L'évolution des performances en fonction du taux de charge dépend principalement du type de contrôle du compresseur. Les climatiseurs individuels air/air ne comprennent qu'un unique compresseur pouvant fonctionner en Tout Ou Rien (TOR) ou à vitesse variable⁹³.

- Impact du taux de charge sur les performances dans le cas d'un fonctionnement du compresseur en mode Tout Ou Rien (TOR)

En mode TOR, le compresseur ne peut fonctionner qu'à une seule vitesse. Lorsque la température du local à refroidir est inférieure ou égale à la limite basse de la zone de consigne, le compresseur s'arrête. Lorsque cette température est supérieure ou égale à la limite haute de la zone de consigne, le compresseur se met en fonctionnement.

Toutes choses égales par ailleurs, ce type de contrôle provoque une détérioration de l'efficacité à charge partielle par rapport au fonctionnement à pleine charge. En effet, au démarrage du compresseur, une partie de la puissance frigorifique est utilisée pour rétablir les conditions de paroi à l'évaporateur et au condenseur, ainsi que l'état thermodynamique du frigorigène réduisant alors la puissance frigorifique disponible. A l'arrêt du compresseur, cette énergie fournie au fluide frigorigène est toujours disponible mais est généralement perdue. D'autre part, les consommations de veilles pendant la période d'arrêt du compresseur ne sont généralement pas négligeables et font tendre l'EER vers zéro lorsque la charge tend vers zéro.

L'évolution de l'EER à charge partielle en fonction du taux de charge peut être modélisée linéairement, comme par exemple dans l'équation (4.4), où Parken et *al.* (1977) introduisent pour la première fois le coefficient de dégradation à charge partielle (C_d).

$$\frac{EER}{EER_{Nom}} = 1 - C_d \cdot (1 - TC) \quad (4.4)$$

Avec : EER : EER à charge partielle, EER_{Nom} : EER à pleine charge
 C_d : coefficient de dégradation à charge partielle
 TC : taux de charge

Certains modèles incluent de façon plus précise les pertes dues aux consommations de veille en ajoutant à l'équation précédente une dégradation hyperbolique de l'EER quand le taux de charge s'approche de zéro. Henderson et *al.* (2000) ont par exemple établi l'équation (4.5) décrivant l'évolution de l'EER en fonction du taux de charge. Cette évolution est tracée Figure 4.4 pour des coefficients C_d et C_c respectivement égaux à 0,2 et 0,025 (ces valeurs sont représentatives des appareils actuels équipés de compresseurs fonctionnant en TOR).

$$\frac{EER}{EER_{Nom}} = \frac{(1 - C_d \cdot (1 - TC)) \cdot TC}{C_c + TC \cdot (1 - C_c)} \quad (4.5)$$

Avec : EER : EER à charge partielle, EER_{Nom} : EER nominal (à pleine charge)
 C_d : coefficient de dégradation à charge partielle
 C_c : coefficient de dégradation liée aux consommations de veilles (arrêt du compresseur)
 TC : taux de charge

⁹³ "Inverter driven compressors".

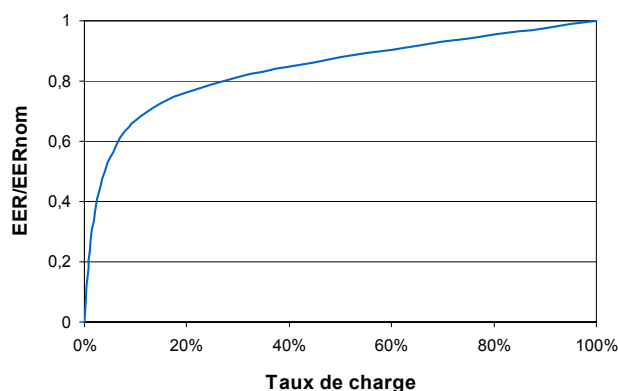


Figure 4.4. Evolution de l'EER en fonction du taux de charge pour un appareil dont le compresseur fonctionne en mode Tout Ou Rien (d'après Henderson et al. (2000))

- Impact du taux de charge sur les performances dans le cas d'un compresseur fonctionnant à vitesse variable

Lorsque le compresseur est entraîné par un moteur électrique à vitesse variable, celui-ci fonctionne en permanence en adaptant sa vitesse, et donc le débit de réfrigérant, aux besoins du bâtiment. Ce mode de contrôle permet un usage optimisé des composants (compresseur, échangeurs) et une réduction des consommations d'électricité.

Selon les caractéristiques du compresseur, l'efficacité à charge partielle peut être plus ou moins améliorée par rapport à l'efficacité à pleine charge. Ainsi, des données fournies par des fabricants japonais (JRAIA, 2007) sur le comportement de 4 climatiseurs montrent une amélioration de l'EER, pour un taux de charge de 50 %, comprise entre 32 % et 40 % par rapport à la pleine charge (Tableau 4.2). Cependant, en dessous d'un certain taux de charge, le compresseur ne peut plus s'adapter aux besoins et doit alors fonctionner en Tout Ou Rien.

Tableau 4.2. EER à 50 % et 100 % de charge pour 4 appareils munis de compresseurs à vitesse variable (JRAIA, 2007)

	EER _{50%}	EER _{100%}	Gain d'efficacité à 50 % par rapport à la pleine charge
Climatiseur A	5,1	3,67	+ 39 %
Climatiseur B	5,33	3,8	+ 40 %
Climatiseur C	4,45	3,37	+ 32 %
Climatiseur D	4,43	3,29	+ 35 %

Dans le cas d'un compresseur à vitesse variable, une modélisation simplifiée de l'évolution de l'EER en fonction du taux de charge peut consister en une diminution linéaire de l'EER sur la plage de puissance pouvant être couverte par le système à vitesse variable et une courbe de cyclage pour les faibles puissances.

La Figure 4.5 représente cette modélisation simplifiée pour un compresseur qui fonctionnerait à vitesse variable sur une plage de puissance de 40 à 100 % de charge, et aurait un gain d'efficacité de 30 % pour un taux de charge de 40 %.

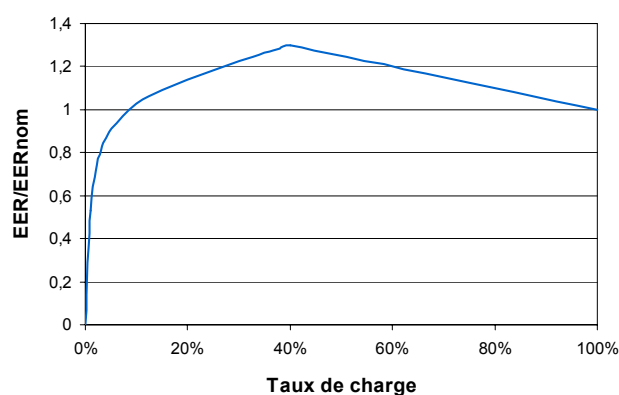


Figure 4.5. Modèle simplifié d'évolution de l'EER en fonction du taux de charge pour un appareil dont le compresseur fonctionne à vitesse variable.

4.1.1.3. Orientations retenues pour la suite du chapitre

L'objectif général de ce chapitre est d'étudier les potentiels d'amélioration des performances des appareils de climatisation individuelle. Afin de réaliser l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) des climatiseurs, nous devons dans un premier temps déterminer la consommation d'électricité des appareils en fonctionnement.

Nous avons vu que si la consommation d'énergie dépendait des conditions climatiques extérieures et de la charge, les performances des appareils étaient aujourd'hui évaluées et déclarées à pleine charge en conditions standardisées. Ce point de fonctionnement nominal n'est pas représentatif du comportement saisonnier de l'appareil et ne permet pas de prendre en compte toutes les améliorations d'efficacité énergétique telles que l'utilisation d'un compresseur à vitesse variable par exemple.

Nous avons donc décidé de développer des indices de performances saisonnières. Ces indices doivent permettre de mieux représenter l'efficacité *in situ* des appareils et d'approcher la consommation d'électricité des appareils de climatisation directement à partir des besoins de refroidissement et de chauffage. Nous nous appliquerons à ce que la consommation électrique annuelle pour le refroidissement s'obtienne à l'aide de l'équation (4.6), où SEER⁹⁴ est l'indice d'évaluation des performances saisonnières en mode refroidissement. Un autre indice (SCOP⁹⁵) devra être développé pour le mode chauffage.

$$C_{Ref_an} = \frac{B_{Ref_an}}{SEER} \quad (4.6)$$

Avec : C_{Ref_an} : consommation électrique annuelle pour le refroidissement,

B_{Ref_an} : besoins annuels de refroidissement,

SEER : indice d'évaluation des performances saisonnières.

Ces indices d'évaluation des performances saisonnières devront prendre en compte l'influence des conditions d'opération (conditions climatiques, taux de charge⁹⁶) sur les performances des appareils. S'il s'avère que les consommations en modes « veille » et « éteint » ne sont pas négligeables au vu de la consommation en mode « actif », elles devront alors être intégrées dans ces indices.

4.1.2 Détermination d'indices de performances saisonnières en mode refroidissement (SEER) et en mode chauffage (SCOP)

4.1.2.1. Cadre du travail

Notre travail sur les indices de performances saisonnières nous a conduit à apporter des contributions au groupe de travail TC 113/WG 7 mis en place par le Comité Européen de Normalisation (CEN) dans le but de composer une nouvelle norme d'évaluation des performances énergétiques de certains appareils de climatisation et de chauffage dont ceux objets de cette thèse. Un des objectifs était d'intégrer des indices de performances saisonnières dans la norme existante EN 14511⁹⁷ afin de permettre une meilleure comparaison des appareils vendus sur le marché européen.

Le fait de réaliser ce travail dans un cadre normatif a nécessité de prendre en compte les préoccupations des industriels du secteur et des organismes de certification. Ainsi, il fut notamment décidé qu'un indice unique pour l'Europe était suffisant en mode refroidissement pour comparer les climatiseurs entre eux, cet indicateur devant être caractéristique de leurs conditions d'opération. En mode chauffage, un des objectifs du CEN était de pouvoir comparer sur les mêmes bases les différents moyens de chauffage disponibles sur le marché (pompes à chaleur, chaudières...). Ces derniers ayant

⁹⁴ Seasonal energy efficiency ratio.

⁹⁵ Seasonal coefficient of performance.

⁹⁶ Qui dépend des conditions climatiques mais aussi des besoins de refroidissement et de chauffage du bâtiment, du dimensionnement de l'appareil, des usages des occupants...

⁹⁷ Nous avons vu en Partie 4.1.1.2 que cette norme reposait notamment sur des conditions d'essais à pleine charge.

des sensibilités au climat⁹⁸ qui leurs sont propres, il était nécessaire d'informer l'utilisateur sur les différences de performance (et de classement des solutions) qui pouvaient résulter des disparités climatiques. C'est pourquoi, nous avons divisé l'Europe en trois zones climatiques (Europe du Nord, Europe centrale, Europe du Sud), un indice d'évaluation des performances saisonnières devant être défini pour chacune de ces zones.

D'autre part, l'objectif de ce travail normatif était de permettre une comparaison des appareils et non d'approcher leur consommation d'électricité directement à partir des besoins de refroidissement et de chauffage. Aussi, une fois le travail de définition des indices présenté, il nous faudra vérifier que les résultats obtenus s'inscrivent parfaitement dans les objectifs de cette thèse en apportant une précision suffisante sur la consommation électrique des appareils.

4.1.2.2. Indices de performances saisonnières : méthodologies pré-existantes

Indices de performances saisonnières existants pour les climatiseurs air/air objets de l'étude

Les Etats-Unis et le Japon sont les premiers pays à avoir intégré les performances à charge partielle dans les normes d'évaluation de l'efficacité énergétique des climatiseurs air/air de petite puissance⁹⁹. La norme américaine ARI 210/240 (ARI, 2006) porte sur les appareils non réversibles de puissance frigorifique inférieure à 19 kW (65000 Btu/h) et les pompes à chaleur réversibles de puissance calorifique inférieure à 19 kW. La norme japonaise JRA 4043 (JRAIA, 2004a) ne concerne que les systèmes de type split dont les puissances frigorifique et électrique sont inférieures respectivement à 10 kW et 3 kW.

La consommation d'énergie des climatiseurs air/air dépend des températures intérieures et extérieures, de l'humidité, et des besoins de refroidissement et de chauffage (taux de charge). Dans ces deux normes, seules la température extérieure et la charge varient, les autres paramètres restent constants.

Dans le cas du mode refroidissement, les deux normes s'appuient sur une méthode par classes de température (dite méthode « bin » en Anglais) qui repose sur les trois étapes suivantes :

- La définition de classes de température extérieures (par exemple des intervalles de 4 °F pour la norme ARI 210/240 - Figure 4.6b)).
- La détermination d'une courbe de charge de référence, c'est à dire l'association à chacune des classes précédentes, les besoins de refroidissement d'un bâtiment de référence. Dans ces deux normes, les courbes de charges utilisées sont des droites. Une hypothèse de dimensionnement permet ensuite d'exprimer les besoins du bâtiment en pourcentage de la puissance frigorifique nominale¹⁰⁰. La Figure 4.6a) est donnée à titre d'exemple, elle présente la courbe retenue dans la norme américaine ARI 210/240 (l'hypothèse de dimensionnement est ici que la puissance frigorifique de l'appareil à 35 °C (95 °F) est égale à 110 % des besoins du bâtiment à cette même température).
- La définition d'un climat de référence, c'est à dire la répartition d'occurrence annuelle des classes de température (en heures par exemple) sur la saison. Connaissant la courbe de charge du bâtiment, ce climat de référence peut aussi être exprimé sous la forme d'une distribution des besoins de refroidissement pour chaque intervalle de température (Figure 4.6b)).

⁹⁸ De façon directe comme pour les pompes à chaleur ou les panneaux solaires ou de façon indirecte comme pour les chaudières qui sont sensibles à la charge.

⁹⁹ La Corée et la Chine firent de même par la suite, les normes de ces deux pays ne sont pas présentées ici.

¹⁰⁰ C'est à dire dans les conditions standardisées, à pleine charge et à 35 °C.

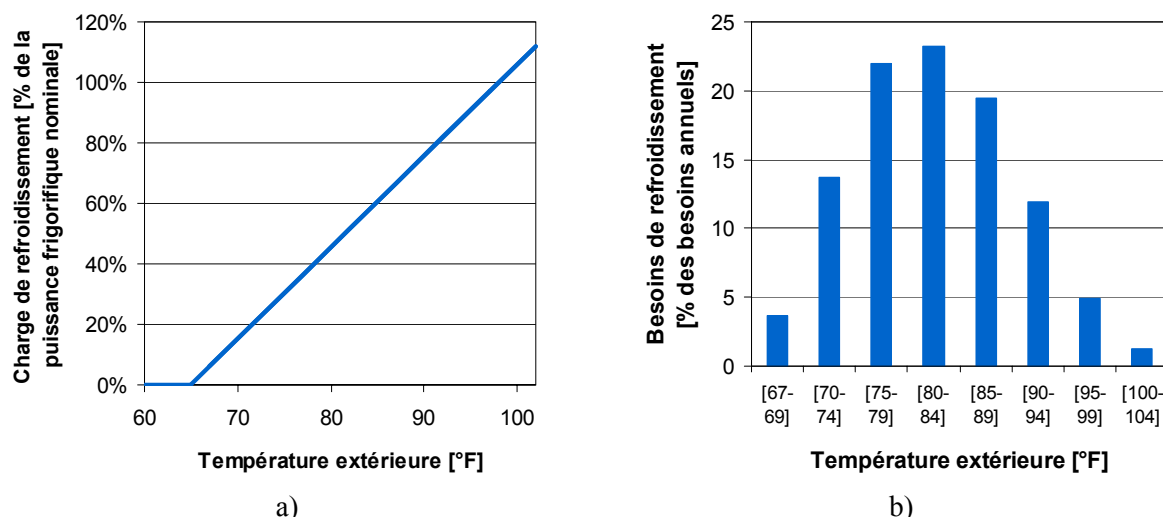


Figure 4.6. Hypothèses fondatrices de la norme ARI (a) Taux de charge auquel fonctionne l'appareil en fonction de la température extérieure (b) Répartition des besoins de refroidissement en fonction de la température extérieure

La connaissance des performances¹⁰¹ (puissance électrique consommée) pour chaque couple charge/température extérieure permet alors de déduire le coefficient de performance saisonnier à partir de l'équation (4.7). Il s'agit d'un ratio entre les puissances frigorifiques et électriques pondérées par les occurrences des classes de température.

$$SEER = \frac{\sum_i P_B(T_i, C_i) \cdot n_i}{\sum_i P_E(T_i, C_i) \cdot n_i} \quad (4.7)$$

Avec : P_B : charge thermique de la classe de température i ,
 P_E : puissance électrique dans la classe de température i et pour un taux charge C_i ,
 T_i : température de la classe i (par définition la médiane de cette classe),
 C_i : taux de charge associé à la classe de température i ,
 n_i : occurrence de la classe de température i (en heures).

Dans le cas du mode chauffage, les deux normes utilisent également des méthodes par classe de température. Celles-ci ne révèlent pas de différence significative avec ce qui a été décrit pour le mode refroidissement et ne sont donc pas présentées en détail dans cette partie. On se référera à (Rivière et Grignon-Massé, 2008) pour une comparaison des différents indices de performances saisonnières existant en mode chauffage.

Indices de performances saisonnières existant en Europe

Concernant les appareils de climatisation ou de chauffage à compression mécanique¹⁰², le seul indice de performance saisonnière existant en Europe concerne les groupes de production d'eau glacée. A l'heure actuelle, cet indice, le ESEER (European Seasonal Energy Efficiency Ratio), n'a pas d'usage normatif mais est utilisé dans le cadre du programme volontaire de certification Eurovent¹⁰³.

Cet indice, adopté par Rivière (2004) sur la base de l'IPLV¹⁰⁴ (ARI, 1998), est une moyenne arithmétique pondérée de différents ratios d'efficacité énergétique mesurés à différentes températures

¹⁰¹ Les performances peuvent être mesurées ou calculés à l'aide de modèle simplifié et de mesures.

¹⁰² Il existe aussi des méthodes normatives d'évaluation des performances saisonnières pour les chaudières telles que la méthode SEDBUK au Royaume Uni.

¹⁰³ Ainsi, une très grande majorité des constructeurs doivent le mentionner lors de la vente de leurs produits.

¹⁰⁴ Integrated Part Load Value.

extérieures et à différentes charges (équation (4.8))¹⁰⁵. Comme pour les deux normes précédemment présentées, il repose sur une méthode par classes de température. Les coefficients de pondération ainsi que les conditions d'essais (Tableau 4.3) sont supposés représentatifs des conditions d'opérations moyennes de ces appareils en Europe.

$$ESEER = 0,03 \cdot EER_A + 0,33 \cdot EER_B + 0,41 \cdot EER_C + 0,23 \cdot EER_D \quad (4.8)$$

Avec EER_x l'EER mesuré pour les conditions d'essais données dans le Tableau 4.3 (EER_A est donc l'EER nominal).

Tableau 4.3. Conditions d'essais pour la détermination du ESEER

	Charge [%]	Température extérieure [°C]
A	100	35
B	75	30
C	50	25
D	25	20

4.1.2.3. Méthodologie générale adoptée

Pour notre travail, une méthode par classes de température telle que celles présentées dans la partie 4.1.2.2 sera utilisée avec pour seules variables, la température extérieure et la charge. Il s'agit donc essentiellement de déterminer des courbes de charge de bâtiment de référence (partie 4.1.2.4) et des climats de référence (partie 4.1.2.5). Les aspects méthodologiques essentiels pour la suite du travail sont exposés ci-après. Les originalités au regard des méthodes existantes sont notamment soulignées (prise en compte des consommations de veille et du chauffage d'appoint).

Classes de températures et nombre de tests

Après concertation avec les utilisateurs et au vu de l'état de l'art, il a été décidé que les indices de performances saisonnières reposeraient sur des classes de températures de 1 °C. Le nombre de tests pourra ensuite être réduit en utilisant des modèles simplifiés permettant de calculer les performances des appareils pour les différentes classes, à partir des mesures effectuées lors de quelques tests.

Equations retenues pour la caractérisation des appareils en mode « actif »

Pour assurer une cohérence avec l'ESEER existant (partie 4.1.2.2), nous avons choisi de rechercher, pour le calcul du SEER et du SCOP, une équation faisant directement intervenir les efficacités.

Dans le cas du mode refroidissement, si B est le besoin de refroidissement supposé constant sur une période donnée et, EER l'efficacité moyenne de l'appareil de climatisation utilisé dans ce bâtiment sur cette même période, alors l'électricité consommée par cet appareil (C) peut s'écrire :

$$C = \frac{B}{EER} \quad (4.9)$$

Ce calcul peut en théorie être effectué pour chaque pas de temps (par exemple chaque heure), puis sommé sur l'ensemble de la saison. L'efficacité saisonnière est ainsi obtenue (équation (4.10)).

$$SEER_{actif} = \frac{\sum_{saison} B}{\sum_{saison} C} = \frac{\sum_{saison} B}{\sum_{saison} \frac{B}{EER}} \quad (4.10)$$

La base de la méthode par classes de températures consiste à déterminer l'occurrence de ces classes de températures sur l'ensemble de la saison. A chaque classe de températures est associée une valeur

¹⁰⁵ Cette formule est mathématiquement inexacte. Comme l'a montré Hitchin (2006), l'ESEER devrait s'écrire comme une moyenne harmonique et non pas arithmétique. En termes de résultat, la différence entre les deux formules reste cependant assez faible.

d'EER et un besoin de refroidissement. Il devient ainsi possible de calculer la consommation sur la saison en utilisant ces classes de températures (équation (4.11)).

$$\sum_{saison} C = \sum_{i=1}^N \frac{n_i \cdot B_i}{EER_i} \quad (4.11)$$

Avec : n_i : occurrence de la classe de température i [h],
 B_i : besoin de refroidissement associé à la classe de température i ,
 EER_i : EER associé à la classe de température i ,
 N : le nombre de classes de température.

Le SEER de l'appareil en mode « actif » s'écrit alors comme indiqué par l'équation (4.12).

$$SEER_{actif} = \frac{\sum_{i=1}^N n_i \cdot B_i}{\sum_{i=1}^N \frac{n_i \cdot B_i}{EER_i}} \quad (4.12)$$

De façon similaire, le SCOP de l'appareil en mode « actif » se calcule à partir de l'équation (4.13).

$$SCOP_{actif} = \frac{\sum_{i=1}^N n_i \cdot B_i}{\sum_{i=1}^N \frac{n_i \cdot B_i}{COP_i}} \quad (4.13)$$

Avec : n_i : occurrence de la classe de température i (h)
 B_i : besoin de chauffage associé à la classe de température i
 COP_i : COP associé à la classe de température i
 N : le nombre de classes de température

Prise en compte du chauffage d'appoint

Lors du dimensionnement d'une pompe à chaleur (PAC), une température de dimensionnement est fixée. Elle correspond à la température extérieure la plus faible au dessus de laquelle l'appareil seul suffit à fournir l'énergie nécessaire au chauffage. En dessous de cette température, la pompe à chaleur ne permet plus de couvrir l'ensemble des besoins calorifiques et il est nécessaire d'utiliser un chauffage d'appoint pour maintenir la température de consigne (Figure 4.7). La pertinence des différentes solutions d'appoint (chaudière, radiateurs électriques...) est alors à étudier au cas par cas (optimisation économique, aspects techniques...).

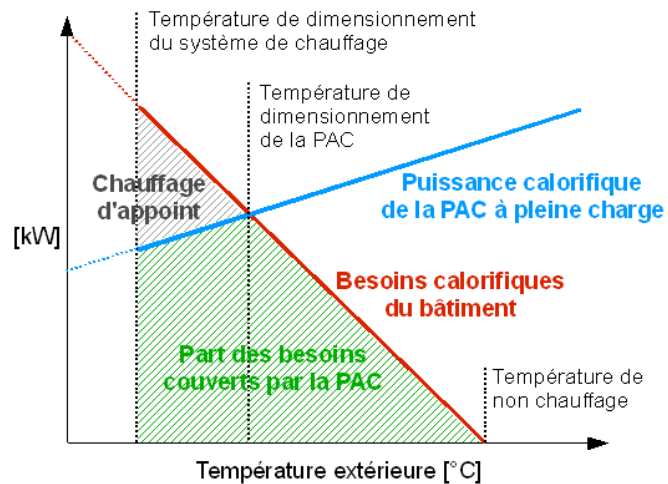


Figure 4.7. Répartition entre les besoins couverts par la PAC et ceux couverts par le système d'appoint

La dégradation de la puissance calorifique, lorsque la température extérieure diminue, varie de façon importante selon les PAC¹⁰⁶. Aussi, afin de permettre une comparaison équitable des appareils, avons-nous décidé de prendre en compte l'appoint dans l'indice d'efficacité saisonnière en mode chauffage.

Le chauffage d'appoint est supposé être de type résistif avec un COP égal à 1. Il est considéré que la pompe à chaleur continue de fonctionner lorsque le chauffage d'appoint s'enclenche et que le système

¹⁰⁶ La température d'arrêt de fonctionnement peut par exemple varier de 0 °C à - 10 °C selon les appareils.

de chauffage dans son ensemble (pompe à chaleur et appoint) n'est jamais sous-dimensionné. Le choix d'un appoint résistif repose sur le fait qu'une très grande part des appareils vendus aujourd'hui sont munis d'une résistance électrique pour suppléer la pompe à chaleur. D'autre part, pour une question de lisibilité, il était opportun de ne garder qu'une seule énergie d'appoint qui n'obligeait pas à raisonner en énergie primaire.

Ainsi, lorsque pour une classe de température donnée (i), la puissance calorifique de la pompe à chaleur (P_{Ci}) est inférieure aux besoins du bâtiment (B_i), la puissance électrique consommée par le chauffage d'appoint (P_{Ri}) s'écrit comme la différence entre ces deux puissances (équation (4.14)).

$$\begin{aligned} P_{Ri} &= B_i - P_{Ci} & \text{si } B_i > P_{Ci} \\ P_{Ri} &= 0 & \text{si } B_i \leq P_{Ci} \end{aligned} \quad (4.14)$$

Avec la prise en compte du chauffage d'appoint, l'indice de performances saisonnières en mode actif (équation (4.13)) devient alors :

$$SCOP_{actif} = \frac{\sum_{i=1}^N n_i \cdot B_i}{\sum_{i=1}^N n_i \cdot \left(\frac{B_i - P_{Ai}}{COP_i} + P_{Ai} \right)} \quad (4.15)$$

Prise en compte des consommations en modes « veille » et « éteint »

Les $SEER_{actif}$ et $SCOP_{actif}$ permettent de caractériser l'appareil en mode « actif ». Dans le cadre de ce travail, il a été proposé de prendre en compte les autres modes d'opération qui peuvent être à l'origine de consommations d'électricité importantes. Ces dernières peuvent être simplement évaluées en multipliant les puissances électriques des différents modes par les heures de fonctionnement. Les efficacité saisonnières s'écrivent alors comme indiqué par les équations (4.16) et (4.17).

$$SEER = \frac{\sum_{saison} B_R}{\sum_{saison} C_{actif} + \sum_{saison} C_{veilles}} = \frac{\sum_{saison} B_R}{\frac{\sum_{saison} B_R}{SEER_{actif}} + h_{va} \cdot P_{va} + h_{vp} \cdot P_{vp} + h_e \cdot P_e + h_{rc} \cdot P_{rc}} \quad (4.16)$$

$$SCOP = \frac{\sum_{saison} B_C}{\frac{\sum_{saison} B_C}{SCOP_{actif}} + h_{va} \cdot P_{va} + h_{vp} \cdot P_{vp} + h_e \cdot P_e + h_{rc} \cdot P_{rc}} \quad (4.17)$$

Avec : $\sum_{saison} B_R$, $\sum_{saison} C_{actif}$ et $\sum_{saison} C_{veilles}$ respectivement les besoins de refroidissement sur la saison, la consommation électrique en mode « actif » sur la saison et la consommation électrique en mode « veille » et « éteint » sur la saison,

$\sum_{saison} B_C$ les besoins de chauffage sur la saison,

h_{va} , h_{vp} , h_e , h_{rc} les heures de fonctionnement en modes « veille active », « veille passive » et « éteint » et les heures de fonctionnement de la résistance de carter,

P_{va} , P_{vp} , P_e , P_{rc} les puissances électriques consommées en modes « veille active », « veille passive », « éteint » et par la résistance de carter.

4.1.2.4. Détermination de courbes de charge de référence

Nous avons défini des courbes de besoins à partir de simulations effectuées antérieurement pour différents bâtiments et différents climats dans le cadre du projet sur l'écoconception des climatiseurs individuels (Rivière et al., 2009).

La Figure 4.8 est donnée à titre d'exemple pour un bureau neuf situé à Milan. Une corrélation linéaire entre les besoins de refroidissement et la température extérieure apparaît mais la dispersion des points est importante. La température de non refroidissement est d'environ 15 °C (de 12 °C à 20 °C selon le bâtiment et le climat). Cette température assez faible traduit le fait qu'il n'y a généralement pas de gestion des ouvertures pour introduire de l'air extérieur (plus frais) à l'intérieur des locaux climatisés et que la ventilation à des fins hygiéniques ne suffit pas à refroidir significativement un bâtiment.

En chauffage, deux nuages de points peuvent être discernés (Figure 4.8), l'un correspond aux besoins lors des périodes d'occupation, l'autre aux besoins lors des périodes d'inoccupation pendant lesquelles la température de consigne est abaissée (et les besoins de chauffage réduits). Malgré une dispersion des points importante, ces deux nuages font chacun ressortir l'existence d'une corrélation linéaire entre les besoins de chauffage et la température extérieure.

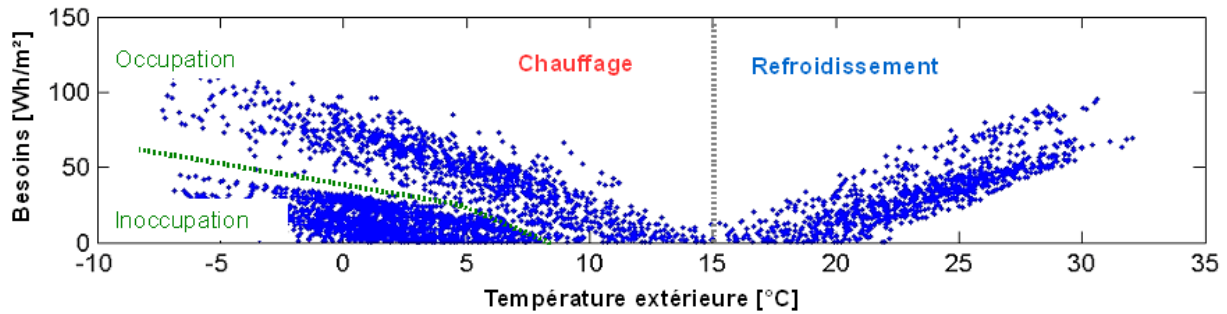


Figure 4.8. Besoins de refroidissement et de chauffage en fonction de la température extérieure pour un bureau neuf à Milan

Pour permettre la détermination d'une courbe de besoins de refroidissement, la valeur de 16 °C est retenue comme température de non refroidissement et il est supposé, pour le dimensionnement, que la puissance frigorifique nominale de l'appareil correspond aux besoins du bâtiment à 35 °C¹⁰⁷. La courbe de besoins de référence retenue est une droite reliant ces deux points comme indiqué par l'équation (4.18).

$$B_j = \frac{T_j - 16}{35 - 16} \cdot P_{nom} \quad (4.18)$$

Avec : B_j est le besoin de refroidissement du bâtiment à la température T_j ,

$T_j = 16 + j$ pour $1 \leq j \leq 24$,

P_{nom} est la puissance frigorifique nominale (35 °C de température extérieure, pleine charge).

En mode chauffage, la valeur de 16 °C sera également retenue comme température de non chauffage. En outre, nous avons supposé que la température de dimensionnement était de -7 °C pour l'Europe centrale, 2 °C pour l'Europe du Sud et -7 °C pour l'Europe du Nord. La courbe de besoins de référence est alors une droite reliant ces deux points comme indiqué par l'équation (4.19).

$$B_j = \frac{T_j - 16}{T_{dim} - 16} \cdot P_{dim} \quad (4.19)$$

Avec : B_j est le besoin de chauffage du bâtiment à la température T_j ,

$T_j = j - 31$ pour $1 \leq j \leq 46$,

P_{dim} puissance calorifique maximale pouvant être fournie par l'appareil à la température extérieure T_{dim} ,

T_{dim} la température de dimensionnement (qui dépend de la zone climatique).

¹⁰⁷ L'appareil est donc dimensionné parfaitement pour maintenir la consigne lorsque la température extérieure est inférieure à 35 °C.

4.1.2.5. Détermination de climats de référence

Détermination d'un climat européen de référence en mode refroidissement

Dans le cadre de ce travail, il a été décidé que la norme ne devait reposer que sur un seul indice en mode refroidissement, et donc sur un seul climat.

Ce climat de référence a été obtenu en exprimant les climats nationaux en nombre d'heures d'occurrence de chaque classe de température T_j ($[T_j-0,5 ; T_j+0,5]$) puis en effectuant une moyenne de ces climats pondérée par les ventes de climatiseurs en 2007. Selon ces chiffres, fournis par JRAIA (2007), les quatre pays les plus importants en termes de ventes, l'Italie, l'Espagne, la Grèce et la France représentent respectivement 29,3 %, 23 %, 9,9 % et 9,5 % des ventes en Europe, soit environ 70 % à eux quatre.

Le climat de référence finalement obtenu est présenté dans le Tableau 4.4.

Connaissant le nombre d'heures d'occurrence de chaque classe de température et la courbe de charge de référence, il devient possible de calculer la répartition des besoins annuels en fonction de la température, ce qui a été fait (Figure 4.9) pour différents climats européens ainsi que pour le climat de référence. Il apparaît que la courbe de besoins de refroidissement et le climat de référence traduisent principalement les conditions de fonctionnement dans les pays du sud de l'Europe, ce qui est dû aux volumes de vente élevés dans ces pays.

Tableau 4.4. Climat de référence obtenu pour l'évaluation des performances en mode refroidissement

Classe de température (j)	Température extérieure [°C]	Occurrence [h]
1	17	205
2	18	227
3	19	225
4	20	225
5	21	216
6	22	215
7	23	218
8	24	197
9	25	178
10	26	158
11	27	137
12	28	109
13	29	88
14	30	63
15	31	39
16	32	31
17	33	24
18	34	17
19	35	13
20	36	9
21	37	4
22	38	3
23	39	1
24	40	0

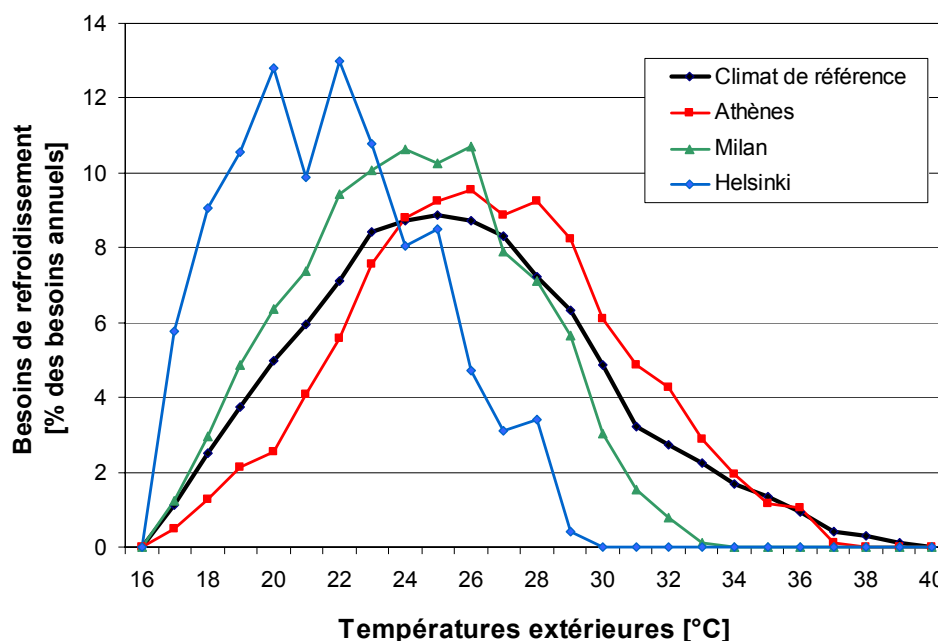


Figure 4.9. Répartition des besoins de refroidissement en fonction de la température extérieure pour 3 climats européens et pour le climat de référence

Détermination de climats de référence en mode chauffage

Dans le cadre de ce travail, un des objectifs fondamentaux était de faire reposer la norme sur plusieurs zones climatiques afin de permettre une meilleure comparaison des différents moyens de chauffage. Les climats de référence retenus sont donnés Tableau 4.5 en nombre d'heures d'occurrence de chaque classe de température T_j ($[T_j-0,5 ; T_j+0,5]$). Il s'agit d'Helsinki pour l'Europe du Nord, de Strasbourg pour l'Europe centrale et d'Athènes pour l'Europe du Sud. Les saisons de chauffage ont été définies différemment selon les climats : du 1^{er} septembre au 31 mai pour Helsinki, du 1^{er} octobre au 31 mai pour Strasbourg et du 1^{er} novembre au 1^{er} mai pour Athènes.

Tableau 4.5. Climats retenus pour l'évaluation des performances en mode chauffage

Classe de température	Températures extérieures [°C]	Occurrence [h]		
		Athènes	Strasbourg	Helsinki
De 1 à 8	De -30 à -23	0	0	0
9	-22	0	0	1
10	-21	0	0	6
11	-20	0	0	13
12	-19	0	0	17
13	-18	0	0	19
14	-17	0	0	26
15	-16	0	0	39
16	-15	0	0	41
17	-14	0	0	35
18	-13	0	0	52
19	-12	0	0	37
20	-11	0	0	41
21	-10	0	1	43
22	-9	0	25	54
23	-8	0	23	90
24	-7	0	24	125
25	-6	0	27	169
26	-5	0	68	195
27	-4	0	91	278
28	-3	0	89	306
29	-2	0	165	454
30	-1	0	173	385
31	0	0	240	490
32	1	0	280	533
33	2	3	320	380
34	3	22	357	228
35	4	63	356	261
36	5	63	303	279
37	6	175	330	229
38	7	162	326	269
39	8	259	348	233
40	9	360	335	230
41	10	428	315	243
42	11	430	215	191
43	12	503	169	146
44	13	444	151	150
45	14	384	105	97
46	15	294	74	61

4.1.2.6. Caractérisation des performances en mode « actif »

Toutes les informations nécessaires au calcul des indices de performances saisonnières en mode actif ont été définies précédemment, à la fois pour le mode refroidissement et pour le mode chauffage.

Ainsi, en refroidissement, l'indice s'évalue à partir de l'équation (4.12), les besoins se calculant *via* l'équation (4.18) et les nombres d'heures d'occurrence des différentes classes étant donnés dans le Tableau 4.4.

D'un point de vue normatif, les appareils doivent être testés dans les conditions données dans le Tableau 4.6. Les températures de test ont été fixées puis les charges associées ont été calculées à partir de l'équation (4.18). Des modèles simplifiés d'évolution des performances avec la température et la charge, permettent d'évaluer l'EER des appareils pour chaque classe de température et de calculer l'indice $SEER_{actif}$.

Tableau 4.6. Conditions de test pour le calcul de l'indice $SEER_{actif}$

	Charge [% de la puissance frigorifique nominale]	Température extérieure [°C]	Température intérieure [°C]
A	100	35	27
B	74	30	27
C	47	25	27
D	21	20	27

En ce qui concerne le chauffage, l'indice de performances saisonnières en mode actif se calcule à partir de l'équation (4.15), les besoins se calculant *via* l'équation (4.18) et les nombres d'heures d'occurrence des différentes classes étant donnés dans le Tableau 4.5.

D'un point de vue normatif, les appareils doivent être testés dans les conditions données dans le Tableau 4.7. Les températures de test ont été fixées puis les charges associées ont été calculées à partir de l'équation (4.19). Des modèles simplifiés d'évolution des performances avec la température et la charge, permettent d'évaluer le COP des appareils pour chaque classe de température et de calculer l'indice $SCOP_{actif}$.

Tableau 4.7. Conditions de test pour le calcul de l'indice $SCOP_{actif}$

	Charge [% de la puissance calorifique à T_{dim}]	Température extérieure [°C]	Température intérieure [°C]
A	$-23/(T_{dim}-16)$	-7	20
B	$-14/(T_{dim}-16)$	2	20
C	$-9/(T_{dim}-16)$	7	20
D	$-4/(T_{dim}-16)$	12	20

4.1.2.7. Prise en compte des modes d'opération différents du mode « actif »

Les équations (4.16) et (4.17) permettent de prendre en compte les modes d'opération différents du mode « actif ». Nous devons maintenant fixer les nombres d'heures d'opération des modes « veille » et « éteint », ainsi que de la résistance de carter¹⁰⁸. Ceux-ci sont rapportés dans le Tableau 4.8. Ils ont été calculés à partir des climats et des courbes de charge de référence en supposant que les bâtiments étaient occupés 10 heures par jour et que, pendant la saison de chauffage, la consigne de température était maintenue lors des périodes d'inoccupation.

¹⁰⁸ La résistance de carter est présentée en Partie 4.1.1.1.

Tableau 4.8. Nombres d'heures d'opération des modes « veille » et « éteint », ainsi que de la résistance de carter en fonction des différents climats

Modes	Heures concernées	Nombre d'heures d'opération [h]			
		Climat moyen	Athènes	Strasbourg	Helsinki
Veille active	Pendant la saison de fonctionnement Consigne de température Pas de besoins frigorifique ou calorifique	221	755	179	131
Veille passive	Pendant la saison de fonctionnement Pas de consigne de température	2142	0	0	0
Eteint	En dehors de la saison de fonctionnement	5088	2189	3672	4345
Résistance de carter	Pendant la saison de fonctionnement Température inférieure à 16 °C	350	2944	3851	4476

En ce qui concerne les besoins annuels de refroidissement et de chauffage, ils sont exprimés en fonction d'un nombre d'heures équivalent à un fonctionnement à puissance nominale pour le refroidissement (équation (4.20)) et d'un nombre d'heures équivalent à un fonctionnement à la puissance de dimensionnement pour le chauffage (équation (4.21)).

$$\sum_{\text{saison}} B_R = 350 \cdot P_{\text{nom}} \quad (4.20)$$

Avec : $\sum_{\text{saison}} B_R$, les besoins de refroidissement sur la saison,

P_{nom} , la puissance calorifique nominale.

$$\begin{aligned} \sum_{\text{saison}} B_C &= 1400 \cdot P_{\text{dim}} \quad \text{pour Athènes et Strasbourg} \\ \sum_{\text{saison}} B_C &= 2100 \cdot P_{\text{dim}} \quad \text{pour Helsinki} \end{aligned} \quad (4.21)$$

Avec : $\sum_{\text{saison}} B_C$, les besoins de chauffage sur la saison,

P_{dim} , la puissance calorifique maximale pouvant être fournie par l'appareil à la température de dimensionnement T_{dim} , qui dépend de la zone climatique.

Afin d'apprécier en quoi la prise en compte des différents modes d'opération peut impacter l'efficacité saisonnière (et donc le bilan de l'ACV), cette dernière a été calculée pour un climatiseur de puissance nominale 6 kW dans le cas où les puissances électriques consommées pour les modes « veille » et « éteint », ainsi que pour la résistance de carter seraient faibles et dans le cas où ces dernières seraient élevées (Tableau 4.9). Les valeurs de puissances électriques retenues proviennent de la partie 4.1.1.1 (et notamment de l'étude (MCE, 2006)).

Tableau 4.9. Hypothèses de puissances électriques consommées pour les modes « veille » et « éteint », ainsi que pour la résistance de carter

	Veille active	Veille passive	Eteint	Résistance de carter
Puissances « élevées » [W]	65	10	5	60
Puissances « faibles » [W]	35	0,2	0	30

L'indice de performances saisonnières prenant en compte les différents modes d'opération du climatiseur (SEER) est calculé en fonction de l'indice $SEER_{\text{actif}}$ qui ne prend en compte que le mode actif. Les résultats sont présentés Figure 4.10.

Il apparaît que les différences peuvent être importantes en termes de SEER pour des machines ayant le même $SEER_{actif}$. Ainsi, pour un $SEER_{actif}$ de 3, la différence entre les deux SEER est déjà de 8 % environ.

De plus, la différence entre SEER et $SEER_{actif}$ peut s'avérer importante. Dans le cas le moins efficace, le SEER n'est que de 2,68 lorsque le $SEER_{actif}$ est de 3, soit une différence de l'ordre de 10 %.

Selon ces résultats, il est important de prendre en compte tous les modes d'opération des appareils pour estimer au plus près leur efficacité réelle. L'amélioration des performances dans des modes autres que le mode actif, peut être à l'origine d'économies d'énergie significatives.



Figure 4.10. Comparaison $SEER/SEER_{actif}$ pour les valeurs de consommations du Tableau 4.9

4.1.2.8. Analyse de la pertinence de ces indices pour la suite de l'étude

L'objectif de ce travail de développement d'indices de performances saisonnières était de permettre une comparaison des appareils mis en vente en Europe. Dans le cadre de cette thèse, il est nécessaire de vérifier que les résultats obtenus permettent d'approcher la consommation d'électricité des climatiseurs directement à partir des besoins de refroidissement et de chauffage de nos bâtiments de référence (chapitre 3). Dans un premier temps, nous comparerons les consommations d'énergie obtenues à l'aide d'un modèle de climatiseur, à celles directement calculées en divisant les besoins de ces pièces par les indices de performances saisonnières (SEER et SCOP) estimés sur la base de notre travail. Nous vérifierons ensuite qu'il est acceptable de tenir compte uniquement des besoins de refroidissement sensibles.

Confrontation entre modélisation d'un climatiseur et utilisation des indices de performances

Les simulations présentées au chapitre 3 permettent d'obtenir les besoins de refroidissement et de chauffage, heure par heure et sur une année, pour les pièces et les climats de référence. A l'aide du modèle de climatiseur réversible présenté en Annexe 3, la consommation d'électricité annuelle pour le chauffage et le refroidissement est évaluée pour deux types de pièces (bureaux et appartements). Les consommations directement obtenues à partir des simulations sont ensuite comparées à celles obtenues avec les indices de performances saisonnières.

Afin de calculer les consommations d'électricité à partir du modèle de climatiseur (Annexe 3), il est nécessaire de se reposer sur une hypothèse de dimensionnement. Le dimensionnement des installations de climatisation dépend de la pièce à climatiser (climat, apports de chaleur...) mais aussi des pratiques d'installation qui tendent généralement à sur-dimensionner les appareils, et ce, pour trois raisons principales :

- l'utilisateur recherche une solution assurant un confort total même en cas d'événement extrême (canicule),
- l'installateur a intérêt à vendre une puissance importante pour augmenter son bénéfice,
- les climatiseurs individuels sont fabriqués en série et seules quelques puissances sont disponibles (effets de gamme).

Pour estimer la puissance frigorifique installée, nous n'avons pas considéré les périodes de relance pour les bureaux (première heure le lundi matin – voir chapitre 3) qui donnaient un surdimensionnement extrêmement élevé pendant les heures restantes (de l'ordre de 100 %). L'hypothèse d'évolution de la puissance frigorifique en fonction de la température (Annexe 3) permet alors d'évaluer la puissance frigorifique nominale (35 °C) nécessaire pour un dimensionnement parfait de l'installation (Tableau 4.10).

Tableau 4.10. Puissances de dimensionnement retenues en mode refroidissement [W/m^2]

	Résidence	Bureaux
Trappes	130	140
Nice	140	155

La connaissance des puissances de dimensionnement permet de calculer la surface couverte par l'appareil. Les consommations directement obtenues à partir des simulations sont ensuite comparées aux consommations calculées en divisant les besoins de refroidissement par les indices de performances saisonnières (SEER et SCOP). Le Tableau 4.11 présente les écarts observés. Ceux-ci sont ici très faibles malgré les différences qui existent entre l'exercice de définition du SEER et celui d'évaluation des consommations à partir du modèle simplifié (pièces de référence, climats de référence...).

Tableau 4.11. Comparaison entre l'électricité consommée par l'appareil calculée à partir de l'indice SEER et celle calculée à partir des simulations (dimensionnement parfait)

Bâtiment	Climats	Besoins de refroidissement [kWh]	SEER	Electricité consommée [kWh]		Différence [%]
				calculée à partir du SEER	calculée à partir des simulations	
Bureau	Trappes	1881	3	627	615	- 2,0
	Nice	3713	3	1238	1229	- 0,7
Appartement	Trappes	294	3	98	98	0,3
	Nice	791	3	264	266	0,7

Etant donné l'incertitude qui pèse sur les pratiques de dimensionnement, nous effectuons les calculs précédents en supposant que l'appareil est surdimensionné de 30 % (Tableau 4.12). Avec le modèle de climatiseur utilisé ici, le surdimensionnement de 30 % implique une détérioration de l'efficacité saisonnière de l'ordre de 5 % (cependant, notre indice SEER reste lui inchangé). Le Tableau 4.12 présente la différence entre la consommation électrique du climatiseur obtenue à partir de l'indice SEER et celle calculée à partir des simulations. Selon les climats et les bâtiments, la différence se situe entre 2,2 % et 8,4 %, ce qui reste tout à fait acceptable au regard des incertitudes qui pèsent sur la simulation des bâtiments¹⁰⁹.

Tableau 4.12. Comparaison entre l'électricité consommée par l'appareil calculée à partir de l'indice SEER et celle calculée à partir des simulations (surdimensionnement de 30 %)

Bâtiment	Climats	Besoins de refroidissement [kWh]	SEER	Electricité consommée [kWh]		Différence [%]
				calculée à partir du SEER	calculée à partir des simulations	
Bureau	Trappes	1447	3	482	493	2,2
	Nice	2856	3	952	1006	5,7
Appartement	Trappes	226	3	75	80	6,1
	Nice	609	3	203	220	8,4

Un travail similaire a été réalisé en mode chauffage en supposant que l'appareil permettait, sans appoint, de pourvoir à tous les besoins. Selon les climats et les bâtiments, la différence entre la consommation électrique du climatiseur calculée à partir de l'indice SCOP, et celle obtenue à partir des simulations, se situe entre - 6 % et 8 %, ce qui reste acceptable au regard des incertitudes qui pèsent sur la simulation des bâtiments.

¹⁰⁹ Comportement des usagers, variance des modèles, différences très importantes entre les bâtiments du parc...

L'utilisation des indices de performances saisonnières permet donc d'approcher convenablement la consommation d'électricité des climatiseurs directement à partir des besoins de refroidissement et de chauffage des pièces de référence définies au chapitre 3.

Est-il acceptable de ne pas tenir compte des besoins latents ?

Nous discutons ici du bien-fondé de l'approche consistant à calculer la consommation des climatiseurs à partir des besoins de refroidissement sensibles, sans tenir compte des charges latentes.

Lors de l'étude EERAC (Adnot et *al.*, 1999), le calcul des besoins sensibles a été complété par le calcul de la puissance de déshumidification nécessaire pour maintenir l'humidité relative intérieure inférieure à 60 % en été. Les calculs, réalisés pour différents climats européens et bâtiments types, ont montré que la différence d'enthalpie était négligeable au regard des charges sensibles : au plus 10 % pour les climats chauds et humides européens, environ 5 % pour le climat de Madrid et quasiment nul pour Paris.

Cependant, même pour des humidités relatives inférieures à 60 %, lorsqu'un climatiseur refroidit l'air d'une pièce, la température de surface de l'échangeur intérieur peut être inférieure à la température de rosée de l'air intérieur. Dès lors, le climatiseur extrait de la chaleur latente¹¹⁰ en plus de la chaleur sensible¹¹¹.

Dans les conditions normatives (Tableau 4.1), qui correspondent à une humidité relative intérieure de l'ordre de 50 %, le ratio entre la puissance sensible extraite et la puissance totale est d'environ 75 %. Comme le montre la Figure 4.11 (modèle de climatiseur retenu par Rivière et *al.* (2009)), ce ratio varie en fonction des conditions de température sèche et d'humidité intérieure. Dans notre cas, la consigne de température opérative est de 26 °C, ce qui correspond généralement à une température de l'air de l'ordre de 24 °C – 25 °C. Ainsi, pour une humidité relative de 50 %, le climatiseur extrait environ 10 - 15 % de la chaleur totale sous forme latente.

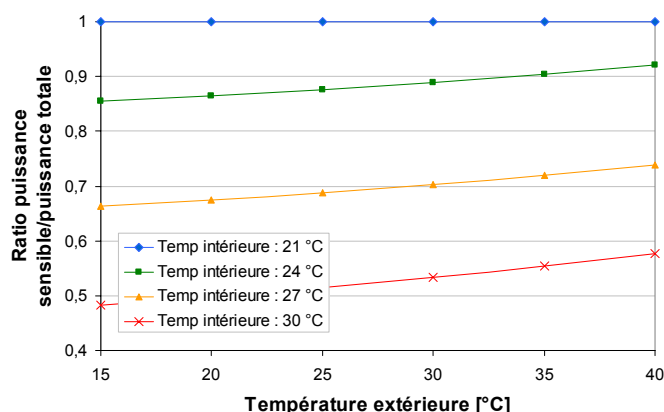


Figure 4.11. Ratio entre la puissance sensible et la puissance totale pour différents jeux de températures intérieures et extérieures

Cependant, la part de puissance latente est fortement réduite lorsque le climatiseur fonctionne à charge partielle (l'essentiel de la saison). Ceci s'explique notamment par :

- le fonctionnement du ventilateur de l'unité intérieure pendant les phase d'arrêt pour les appareils contrôlés en mode tout-ou-rien (Henderson et *al.*, 2007),
- l'augmentation de la température d'évaporation pour les climatiseurs fonctionnant à vitesse variable (Rivière et *al.*, 2009).

Selon ces sources et pour les deux types de contrôle, la charge latente extraite peut être estimée à quelques pourcents de la charge totale de refroidissement dans nos climats tempérés. Nous avons alors considéré que les charges latentes pouvaient être négligées.

¹¹⁰ De la vapeur d'eau se condense sur la batterie en cédant ses calories à l'échangeur intérieur.

¹¹¹ Différence de température entre l'air repris par l'unité intérieure et l'air soufflé.

4.2 Analyse du Cycle de Vie des climatiseurs individuels

L'objectif de cette partie est d'effectuer une Analyse du Cycle de Vie des climatiseurs individuels, ce qui nous permettra d'évaluer l'impact de ces appareils en termes de consommations d'énergie et d'émissions de GES puis d'identifier les potentiels d'amélioration existants.

Pour ce faire, nous utiliserons l'outil d'ACV établi par la Commission européenne dans le cadre de la directive sur l'écoconception des produits consommateurs d'énergie (CE, 2005). Cet outil, créé et décrit par VHK (2005), prend en compte les phases de production, de distribution, d'utilisation et de fin de vie des produits.

4.2.1 Détermination et spécification des appareils de référence

Des appareils de référence, représentatifs des produits vendus en Europe, doivent être définis en termes de caractéristiques techniques. Leurs impacts environnementaux seront évalués, ce qui permettra de définir une base pour l'étude du potentiel d'amélioration des climatiseurs individuels. Comme explicité dans la méthodologie développée dans le cadre de la Directive européenne sur l'écoconception des produits consommateurs d'énergie (VHK, 2005), les appareils de référence sont une abstraction délibérée de la réalité, ceci notamment pour des raisons pratiques (de temps par exemple, il n'est pas possible de multiplier le nombre de produits à étudier).

4.2.1.1. Types d'appareils retenus

Nous avons établi au chapitre 1 que le marché des climatiseurs individuels était principalement composé des appareils de type single splits (80 % en termes de puissance frigorifique), de multi splits (13 %) et d'appareils mobiles (6 %).

Les appareils mobiles ont des caractéristiques très spécifiques qui traduisent principalement le fait qu'ils doivent être facilement transportables (volume et masse limités) :

- utilisation de technologies différentes,
- faible puissance frigorifique (ils ne peuvent souvent pas refroidir l'ensemble de la pièce),
- interaction avec la ventilation du bâtiment (ils rejettent à l'extérieur l'air pris dans la pièce pour refroidir le condenseur, et introduisent donc de l'air extérieur à l'intérieur de la pièce).

Ces appareils ne seront pas considérés dans la suite de l'étude car ils ne représentent qu'une part limitée des ventes, et que leurs caractéristiques particulières nécessiteraient une étude à part entière.

Dotés de technologies similaires, les systèmes « single split » et « multi splits » peuvent être traités ensemble. Une distinction doit cependant être effectuée entre appareils réversibles et non réversibles car leurs durées de fonctionnement diffèrent fortement. Le marché des climatiseurs est donc finalement séparé en deux catégories, les split réversibles d'une part et les split non réversibles d'autre part. Un appareil de référence doit être défini pour chacune d'entre elles.

4.2.1.2. Spécifications techniques des appareils de référence

Données utilisées

Le catalogue Eurovent a été utilisé pour ce travail de définition des appareils de référence car il contient l'ensemble des appareils produits par plus de 70 % des fabricants actuels de climatiseurs. L'organisme Eurovent-Certification¹¹² certifie les performances de produits de climatisation et de réfrigération, en accord avec les normes européennes et internationales. En choisissant de participer au programme Eurovent-Certification, les fabricants sont tenus de soumettre à certification tous leurs modèles inclus dans le domaine d'application, ceux-ci pouvant alors être testés de façon indépendante.

¹¹² C'est une branche d'Eurovent/Cecomaf, l'Association Européenne de Fabricants d'Équipement de Conditionnement d'Air et de Réfrigération, qui couvre une grande partie des produits objets de notre étude.

En contrepartie, ces fabricants peuvent ensuite bénéficier de l'étiquetage Eurovent-Certification et inclure leurs produits dans le catalogue annuel Eurovent utilisé par les bureaux d'étude et les installateurs (Eurovent, 2006a). Ce catalogue, utilisé ici, contient des informations sur les performances énergétiques des produits (puissance frigorifique, EER...) ainsi que quelques caractéristiques techniques (bruit, fluide frigorigène utilisé, type d'unité intérieure...).

Cependant, quand nous avons voulu déterminer des caractéristiques techniques plus détaillées, cette base de données nous est apparue insuffisante. Nous avons alors utilisé une autre base de données, que gère Eurovent (Eurovent, 2006b), et qui contient les caractéristiques techniques exhaustives de produits ayant été testés par Eurovent dans le cadre du programme Eurovent-Certification.

Définition des climatiseurs de référence

A partir des deux bases de données précédentes, nous avons mené un travail d'analyse statistique dans le but de définir des appareils de référence. Cette analyse statistique, reproduite intégralement dans (Rivière et al., 2009), permet d'aboutir à deux appareils de petite puissance frigorifique¹¹³ (3,5 kW) dont les caractéristiques principales sont présentées dans le Tableau 4.13. Les performances énergétiques en conditions non normalisées ont aussi été définies, il s'agit des modèles présentés en Annexe 3.

Tableau 4.13. Caractéristiques principales des appareils de référence

		Split non réversible	Split réversible
Description générale		Mural – Non gainé (230V-1phase-50Hz)	
Performances en refroidissement	Puissance frigorifique	3,5 kW	3,5 kW
	EER	2,9	3,1
	SEER	2,8	3,02
Performances en chauffage	Puissance calorifique	-	4 kW
	COP	-	3,4
	SCOP	-	2,57
Fluide réfrigérant	Type	R410A	R410A
	Charge	0,8 kg	1,2 kg
Unité intérieure	Type de tube	"Grooved"	"Grooved"
	Type d'ailettes	"Louvered"	"Louvered"
	Surface de l'évaporateur	7,4 m ²	8,2 m ²
	Type de ventilateur	Centrifuge	Centrifuge
Unité extérieure	Type de tube	"Grooved"	"Grooved"
	Type d'ailette	"Louvered"	"Louvered"
	Surface du condenseur	12 m ²	13,3 m ²
	Type de ventilateur	Axial	Axial
Compresseur	Type	Rotatif	Rotatif
	Contrôle	Tout ou Rien	Tout ou Rien
	Efficacité (EER SI)	2,8	2,8
	Résistance de Carter	Non	Oui
Détendeur	Type	Capillaire	Capillaire

Efficacité énergétique des cas de référence

La consommation d'énergie étant au centre de notre problématique, il est pertinent d'analyser où se situent nos cas de référence en termes d'efficacité énergétique, par rapport au marché actuel. Les unités réversibles contenues dans les catalogues Eurovent de 2002 et 2006 ont été réparties par classe d'efficacité énergétique (Figure 4.12). Des classes supplémentaires ont été ajoutées à celles actuellement utilisées en Europe (A-G) afin de montrer la disparité des valeurs entre appareils :

¹¹³ Le marché japonais est aujourd'hui un marché mature, très important en volume (de l'ordre de 7 millions de climatiseurs individuels vendus par an, deux fois plus qu'en Europe), où se vendent des appareils de même type que ceux recherchés en Europe. Aussi, n'est-il pas étonnant de retrouver, sur le marché européen, certaines caractéristiques propres au marché japonais et notamment une part importante d'appareils de petites puissances (ce qui s'explique notamment par les faibles surfaces des habitations japonaises).

- mode refroidissement : de la classe G ($EER \leq 2,2$) à A9+ ($5 < EER \leq 5,2$) avec un intervalle de 0,2 pour chaque classe,
- mode chauffage : de la classe G ($COP \leq 2,4$) à A8+ ($5 < COP \leq 5,2$) avec un intervalle de 0,2 pour chaque classe.

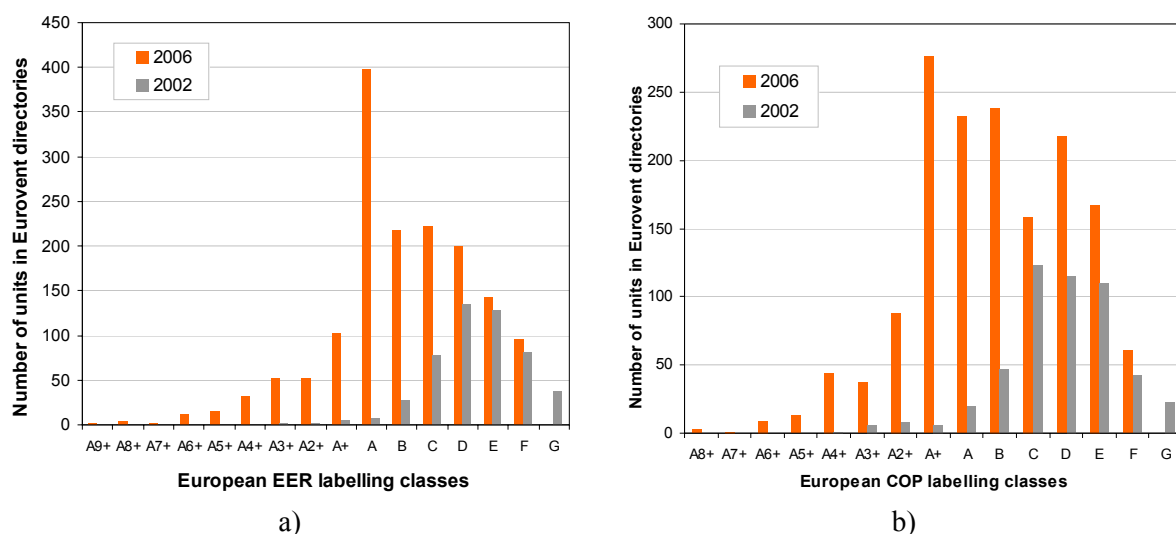


Figure 4.12. Nombre d'unités listées dans (Eurovent, 2006a) par classe d'efficacité énergétique en mode refroidissement (a) et en mode chauffage (b)

Seuls les appareils de petites puissances ont été pris en compte (puissance frigorifique inférieure à 6 kW). Il apparaît que l'appareil de référence appartient à la classe B en mode refroidissement et se situe donc au centre de la distribution puisque environ 43 % des unités sont plus performantes et 43 % le sont moins. Les meilleurs produits sont de classe A9+, ce qui signifie qu'il existait sur le marché en 2006 des produits 1,65 fois plus performants que notre appareil de référence en termes d'EER.

En mode chauffage, l'appareil de référence appartient à la classe B et se situe donc au centre de la distribution puisque environ 40 % des unités sont plus efficaces et 45 % le sont moins. Les meilleurs produits sont de classe A8+, ce qui signifie qu'il existait sur le marché en 2006 des produits 1,6 fois plus performants en matière de COP.

Concernant l'appareil de référence non réversible, un travail similaire a été effectué (Figure 4.13).

Des classes supplémentaires ont été ajoutées à celles actuellement utilisées en Europe afin de montrer la disparité des valeurs entre appareils : de la classe G ($EER \leq 2,2$) à A5+ ($4,2 < EER \leq 4,4$) avec un intervalle de 0,2 pour chaque classe. Seuls les appareils de petites puissances ont été pris en compte (< 6 kW).

Il apparaît que l'appareil de référence appartient à la classe C et se situe au centre de la distribution puisque environ 30 % des unités sont plus efficaces et 50 % le sont moins.

Les meilleurs produits sont de classe A4+, ce qui signifie qu'il existait sur le marché en 2006 des produits 1,4 fois plus performants que le cas de référence en termes d'EER.

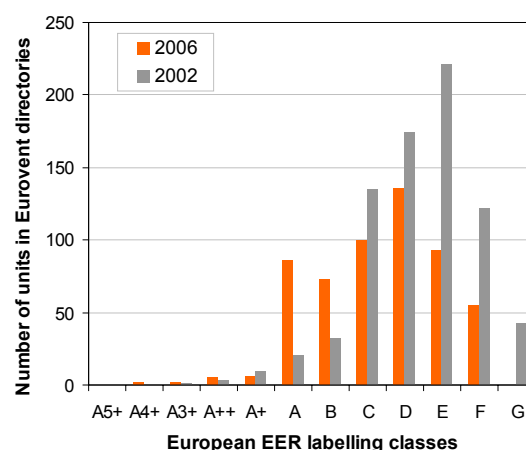


Figure 4.13. Nombre d'unités listées dans (Eurovent, 2006a) par classe énergétique

Le cas de référence réversible est plus efficace que le cas non réversible (en termes d'EER). Ceci s'explique en partie par le fait que les fabricants mettent aujourd'hui l'accent sur le développement des

premiers. Ainsi, en 2004, l'ADEME (2004) mentionnait que certains industriels se lançaient d'ores et déjà dans la production d'appareils réversibles en stoppant celle d'appareils de « refroidissement seul ».

4.2.2 Collecte des données nécessaires à l'ACV

Cette partie présente les données principales nécessaires à la réalisation de l'Analyse du Cycle de Vie des climatiseurs. Une description plus détaillée de l'outil d'ACV, et notamment des hypothèses, se trouve dans (VHK, 2005).

4.2.2.1. Phase de production

L'impact environnemental de cette phase de la vie du produit dépend des matériaux que le produit contient et de leurs quantités. Dans le cadre du projet sur l'écoconception des climatiseurs individuels, plusieurs fabricants ont fourni la description de certains de leurs appareils en termes de matériaux utilisés et les poids correspondants (Rivière et al., 2009). Ceci nous a permis de construire un inventaire des matériaux pour les deux cas de référence (Tableau 4.14). L'unique différence entre les cas réversible et non réversible est l'ajout d'une vanne quatre voies, d'un deuxième détendeur et d'un peu plus de cuivre pour la tuyauterie. Concernant les réparations et la maintenance, la valeur de 1 % de matériaux supplémentaires est retenue (VHK, 2005).

Tableau 4.14. Inventaire des matériaux contenus dans les deux appareils de référence

Matériaux composants les produits	Poids [g]	
	Appareil de référence non réversible (3,5 kW)	Appareil de référence réversible (3,5 kW)
Plastiques	8601,2	8601,2
Métaux ferreux	19821,9	19821,9
Métaux non-ferreux	10516,3	11016,3
Electronique	1461,5	1461,5
Autres matériaux divers	5053,3	5053,3

4.2.2.2. Phase de distribution

Les volumes des cas de référence sont nécessaires à l'évaluation de l'impact du transport qui s'effectue par voie maritime à partir de centres de fabrication situés en Asie. La valeur de 0,25 m³ est retenue pour les deux cas de référence.

4.2.2.3. Phase d'utilisation

Durée de vie

Dans notre cas, la durée de vie est la période pendant laquelle l'appareil fonctionne et consomme de l'énergie. Celle-ci dépend de nombreux facteurs et notamment de la localisation : les climats marins (corrosion) ou les climats chauds (nombre d'heures de fonctionnement élevé) contribueront par exemple à réduire la durée de vie des appareils.

Le Tableau 4.15 présente une comparaison des durées de vie des climatiseurs de type Split selon différentes sources. Ces valeurs sont comprises entre 10 et 16 ans, une durée de vie de **12 ans** est finalement retenue pour la suite de notre étude.

Tableau 4.15. Durées de vie des climatiseurs de type Split

Sources	Durées de vie [années]
(Energy Star, 2007)	10
(MEDAD, 2009)	16
(Adnot et al., 1999)	12,5
(JRAIA, 2004b)	12

Consommation de fluide frigorigène

Les défauts d'étanchéité des circuits frigorifiques des climatiseurs sont à l'origine de fuites de fluide frigorigène. Le taux de fuite est défini comme la quantité de fluide rejetée annuellement par rapport à la charge contenue dans l'appareil ; nous l'avons déterminé sur la base de la bibliographie.

Une enquête de terrain sur les taux de fuite des systèmes de refroidissement et de climatisation a été menée en France (CETIM, 2004) et a abouti à une estimation du taux de fuite d'environ 3,8 % pour deux systèmes Split fonctionnant au R22. En 2002, les constructeurs français de matériels aéraulique, thermique, thermodynamique et frigorifique se sont engagés avec le CETIM (Centre technique des industries mécaniques) et le CETIAT (Centre technique des industries aérauliques et thermiques) dans la réalisation d'une ACV d'un climatiseur de type Split (Barnabé, 2003). Le taux de fuite considéré dans cette étude était de 4 %, auquel il fallait ajouter environ 2 % de perte lors de l'installation. Dans leur inventaire des émissions nationales de fluides frigorigènes, Barrault et *al.* (2004) retiennent, quant à eux, une valeur de 5 % pour les systèmes Split et de 15 % pour les Multi-Split de puissance frigorifique inférieure à 17,5 kW. Enfin, le GIEC (IPCC, 2005), se basant sur les travaux de l'UNEP (2003), considère des taux de fuite annuels de l'ordre de 4 à 5% de la charge nominale pour les systèmes Split.

Il apparaît que le taux de fuite annuel serait de l'ordre de 4 %. Cette étude portant sur les appareils neufs de petite puissance, **le taux de fuite considéré dans la suite de l'étude est un peu plus faible et s'élève à 3 %** sans inclure les pertes de fin de vie. D'autre part, il est supposé que les climatiseurs individuels ne sont pas rechargés en fluide au cours de leur vie, ce qui est généralement le cas en pratique.

Consommation d'électricité

Afin d'évaluer les consommations d'électricité de nos climatiseurs de référence, nous avons utilisé les résultats de simulations obtenus au chapitre 3 (besoins de refroidissement et de chauffage au pas de temps horaire et par unité de surface) pour les pièces de référence (sans action d'amélioration du confort d'été). Les puissances frigorifiques et calorifiques des deux climatiseurs de référence étant connues (Tableau 4.13), nous pouvons estimer les surfaces climatisées et chauffées par chacun des appareil en supposant un dimensionnement parfait des appareils. Dès lors, connaissant les besoins unitaires de refroidissement et de chauffage ainsi que les efficacités saisonnières des appareils de référence, il devient possible de calculer la consommation d'électricité annuelle de ces derniers (Tableau 4.16).

Les consommations électriques varient de 98 kWh/an (appartement à Trappes) à 1238 kWh/an (bureau à Nice) pour l'appareil non réversible, et de 388 kWh/an (appartement à Nice) à 1208 kWh/an (bureau à Nice) pour l'appareil réversible. Les valeurs moyennes de 632 kWh/an et 845 kWh/an sont retenues pour la suite de l'ACV mais des analyses de sensibilité seront réalisées.

Tableau 4.16. Consommation électrique des appareils de référence pour différents bâtiments

		Consommation électrique [kWh/an]	
		Cas non réversible	Cas réversible
Trappes	Bureau	627	782
	Boutique	602	962
	Résidence	98	651
Nice	Bureau	1238	1208
	Boutique	961	1079
	Résidence	264	388
Moyenne		632	845

L'outil d'ACV utilisé a été conçu dans un contexte européen et le contenu carbone du kilowattheure électrique consommé correspond à la moyenne du mix européen, soit 460 g de CO_{2-eq}. Une sensibilité pourra être effectuée en prenant en compte les émissions du mix électrique français évaluées à environ 90 g de CO_{2-eq} par kilowattheure consommé.

Evolution des performances avec le temps

Avec le vieillissement de l'appareil, les performances sont susceptibles de décliner : diminution de l'efficacité énergétique, de la puissance frigorifique ...

L'impact de défauts liés au vieillissement sur les performances des appareils de type « Split » de petite puissance a été étudié par Bory (2008)¹¹⁴ pour le mode refroidissement. Selon l'auteur, les impacts les plus significatifs sont les fuites de fluide réfrigérant et l'encrassement du condenseur.

Sans information sur l'encrassement des échangeurs en conditions réelles, il est supposé que les opérations de maintenance sont correctement réalisées par les utilisateurs et que ce phénomène ne se produit pas.

Concernant les fuites de fluide réfrigérant, la Figure 4.14 montre l'évolution de l'EER (pour différentes conditions d'opération) en fonction de la réduction de la charge de fluide. Avec l'hypothèse d'un taux de fuite de 3 %, l'appareil fonctionne en moyenne sur sa durée de vie (12 ans) avec 85 % de sa charge initiale soit une faible baisse des performances de l'ordre de 2 à 5 %. Ainsi, même si la maintenance des appareils a des conséquences en matière d'efficacité énergétique, la diminution des performances avec le temps sera négligée par la suite.

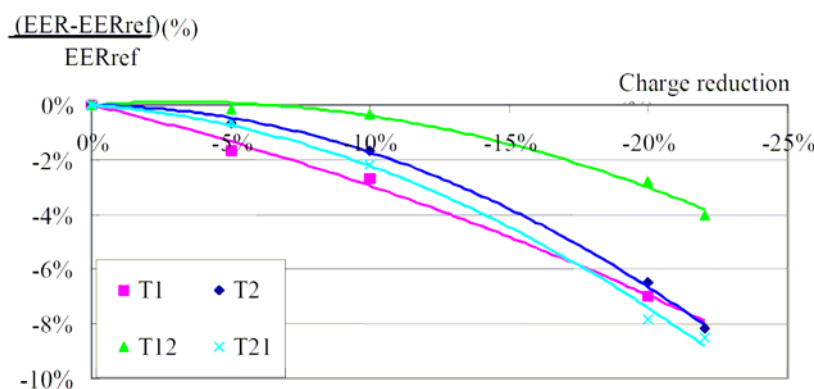


Figure 4.14. Impact des fuites de réfrigérants sur l'EER (Bory, 2008)

4.2.2.4. Phase de fin de vie

Concernant la phase de fin de vie, il est nécessaire d'établir des scénarios sur les pratiques de gestion des déchets vers 2015-2020 lorsqu'un appareil, vendu aujourd'hui, deviendra obsolète.

La directive DEEE

La Directive européenne sur les Déchets d'Equipements Electriques et Electroniques (DEEE) a été adoptée le 13 février 2003 (CE, 2003). Cette directive a pour objectif de limiter les impacts environnementaux des déchets d'équipements électriques et électroniques en promouvant leur réutilisation, leur recyclage et les autres formes de valorisation de ces déchets, de manière à réduire la quantité de déchets à éliminer. Elle vise aussi à améliorer les performances environnementales de tous les opérateurs concernés au cours du cycle de vie des équipements électriques et électroniques, tels que les producteurs, les distributeurs et les consommateurs, et en particulier les opérateurs qui sont directement concernés par le traitement des déchets d'équipements électriques et électroniques.

Des objectifs sont mentionnés dans cette directive pour différentes catégories d'appareils. Les équipements de climatisation sont contenus dans la catégorie « Gros appareils ménagers » pour laquelle le taux de valorisation est porté à 80 % en poids moyen par appareil et celui de réutilisation et de recyclage des composants, des matières et des substances à 75 %.

¹¹⁴ Le travail a porté sur un climatiseur représentatif du stock existant fonctionnant au R22. Aucune source supplémentaire n'a été trouvée sur les pertes de performance des climatiseurs individuels.

Cette directive aborde aussi la gestion des fluides frigorigènes en fin de vie. Il est en effet mentionné dans l'annexe II que :

- les chlorofluorocarbones (CFC), les hydrochlorofluorocarbones (HCFC) et les hydrofluorocarbones (HFC) font partie des substances, préparations et composants qui doivent au minimum être retirés de tout déchet d'équipements électriques et électroniques faisant l'objet d'une collecte sélective,
- les gaz préjudiciables à la couche d'ozone ou présentant un potentiel global de réchauffement climatique (GWP) supérieur à 15 doivent être enlevés et traités selon une méthode adaptée.

Scénarios adoptés pour la gestion des matériaux

A l'horizon 2010, la Directive DEEE devrait théoriquement être respectée en Europe. Aussi, concernant les matériaux en fin de vie, les hypothèses de référence retenues correspondent à un scénario post-DEEE :

- 95 % des déchets sont récupérés et traités,
- pour les métaux et le verre, 95 % sont recyclés,
- pour les plastiques, 1 % est réutilisé, 9 % recyclés et 90 % valorisés énergétiquement.

Le chiffre de 95 % de déchets récupérés est plus élevé que ce qu'exige la directive, mais ce taux de récupération important est la manière la plus efficiente économiquement pour les fabricants de remplir les exigences de la directive selon VHK (2005).

Une étude de sensibilité sera effectuée pour évaluer dans quelle mesure la gestion des matériaux en fin de vie peut affecter les impacts environnementaux sur le cycle de vie de l'appareil. Pour ce faire, deux nouveaux scénarios sont définis (Tableau 4.17) : le scénario 1 suppose que seuls 15 % des déchets sont traités (avec les mêmes hypothèses que le scénario de référence pour le traitement du plastique), le scénario 2 (recyclage) suppose que 95 % des déchets sont traités et que 90 % du plastique récupéré est recyclé.

Tableau 4.17. Scénarios de gestion des déchets retenus

	Scénario de référence	Scénario 1	Scénario 2
Part des déchets récupérés et traités	95 %	15 %	95 %
Parmi ces déchets récupérés			
Part des métaux et verres recyclés	95 %	95 %	95 %
Part des plastiques réutilisés	1 %	1 %	1 %
Part des plastiques recyclés	9 %	9 %	90 %
Part des plastiques valorisés énergétiquement	90 %	90 %	9 %

La Directive F-gas

La directive européenne 2006/842/EC (CE, 2006), dite F-Gas, concerne la limitation des fuites de fluides frigorigènes et l'interdiction progressive de l'utilisation de certains (mais pas ceux actuellement utilisés en climatisation individuelle) dans le but de réduire les émissions de gaz à effet de serre. Elle exige que des mesures de récupération des gaz à effet de serre par du personnel certifié soient mises en place afin d'en assurer le recyclage, la régénération ou la destruction.

Scénarios adoptés pour la gestion des fluides frigorigènes

L'application de la Directive F-Gas devrait théoriquement mener à une situation où tous les fluides frigorigènes seraient récupérés, nous considérons, comme référence, un taux de récupération en fin de vie de 95 %.

Dans la pratique, la solution la plus simple pour qui est en charge de la désinstallation de l'appareil est bien de purger le système et de ne rien récupérer. Le bilan carbone de l'ADEME (2007) estime ainsi à 10 % la part de fluides récupérée en fin de vie pour les appareils de climatisation à air. Une étude de sensibilité sera effectuée pour évaluer dans quelle mesure la gestion des fluides en fin de vie peut impacter le bilan des émissions de GES sur le cycle de vie de l'appareil.

4.2.3 Impacts environnementaux des cas de référence

Les équipements de référence sont évalués sous l'angle de l'ACV à l'aide de l'outil de calcul établi par la Commission européenne dans le cadre de la directive sur l'écoconception des produits consommateurs d'énergie. L'étude exhaustive des impacts environnementaux n'entre pas dans le cadre de notre travail et nous nous concentrons ici sur la consommation d'énergie et les émissions de GES.

4.2.3.1. Répartition des impacts environnementaux au cours du cycle de vie

Les émissions de GES ainsi que la consommation d'énergie primaire sont évaluées pour chaque phase du cycle de vie (production, transport, usage et fin de vie) des deux cas de référence (Figure 4.15 et Figure 4.16). Les émissions liées aux fuites de fluides réfrigérants (lors des phases d'usage et de fin de vie) sont distinguées du reste des émissions de GES.

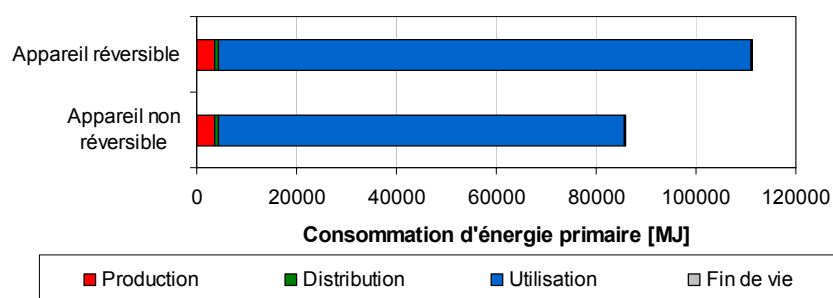


Figure 4.15. Consommation d'énergie primaire au cours des différentes phases du cycle de vie des appareils de référence

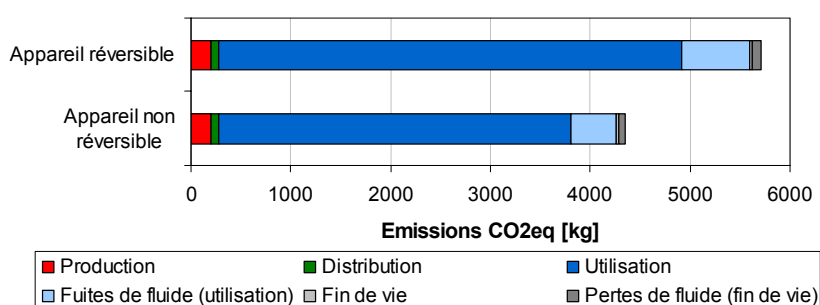


Figure 4.16. Emissions de CO_{2-eq} au cours des différentes phases du cycle de vie des appareils de référence

En ce qui concerne les émissions de GES et les consommations d'énergie primaire, ces résultats montrent que les phases de production, de distribution et de fin de vie n'ont que peu d'impact sur le bilan global.

Ainsi, la phase d'utilisation représente à elle seule environ 95 % de la consommation totale d'énergie primaire sur le cycle de vie. Ceci est en accord avec d'autres études telles que celle réalisée par le CETIM et le CETIAT (Barnabé, 2003) qui concluait que l'énergie consommée en phase d'utilisation représentait 97,6 % de l'énergie totale.

Concernant les émissions de CO_{2-eq}, la phase d'usage reste prépondérante avec environ 92 % des émissions totales. Plus précisément, la consommation d'électricité compte pour environ 81 % des émissions totales sur le cycle de vie, les fuites de fluide frigorigène pour environ 11 %. Attention, ces résultats reposent sur l'hypothèse optimiste d'un taux de récupération des fluides en fin de vie de 95 % (respect de la Directive F-gas).

4.2.3.2. Impact des scénarios de gestion de déchets et des fluides sur la consommation d'énergie, les émissions de GES

Concernant la phase de fin de vie, des scénarios de gestion efficace des déchets et des fluides ont été supposés avec le respect des directives DEEE et F-gas. Dans cette partie, une étude de sensibilité est effectuée pour évaluer dans quelle mesure la prise en compte de scénarios différents modifient les résultats.

Le Tableau 4.18 présente l'influence des différents scénarios de gestion des déchets (Tableau 4.17) sur les émissions de CO_{2-eq} et la consommation d'énergie primaire. Il apparaît que le scénario de gestion de déchets n'influe que très peu sur les bilans tenant compte de l'ensemble du cycle de vie. Dans le pire des cas (Scénario 1) les émissions de CO_{2-eq} et la consommation d'énergie subissent une augmentation inférieure à 5 % par rapport au scénario de référence, ce qui reste faible au vu de la situation extrême représentée par le Scénario 1 (seulement 15 % des matériaux récupérés et traités).

Tableau 4.18. Influence des différents scénarios de gestion des déchets sur les émissions de CO_{2-eq} et la consommation d'énergie par rapport au scénario de référence

	Cas de référence non réversible		Cas de référence réversible	
	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 1	Scénario 2
Emissions CO _{2-eq}	+ 4,3 %	- 0,3 %	+ 3,3 %	- 0,2 %
Consommation d'énergie primaire	+ 2,9 %	- 0,5 %	+ 2,3 %	- 0,3 %

Dans le cas des fluides frigorigènes, le scénario de référence suppose que 95 %¹¹⁵ des fluides sont récupérés en fin de vie mais il est fort probable que la situation actuelle soit moins efficace, avec par exemple, un taux de récupération de seulement 10 % selon l'ADEME (2007). La Figure 4.17 représente les émissions de CO_{2-eq} en fonction des hypothèses de taux de récupération des fluides en fin de vie pour les deux cas de référence. Si le taux de récupération des fluides n'est que de 10 %, les émissions totales de GES augmentent alors d'environ 25 % pour les deux appareils de référence. Les pertes de fluide, en fin de vie du climatiseur, comptent alors pour 20 % des émissions totales sur le cycle de vie. Ces derniers résultats sont en accord avec une étude menée au Japon par Yokota et al. (2003) qui concluait qu'en cas de non récupération des fluides, environ 75 % des émissions de GES provenaient de la phase d'usage et 25 % de celle de fin de vie.

L'amélioration du taux de récupération des fluides en fin de vie apparaît donc comme une mesure pouvant réduire significativement les émissions de GES liées à la climatisation individuelle. Cette mesure sera étudiée sous l'angle Coût-Bénéfice dans la suite de l'étude.

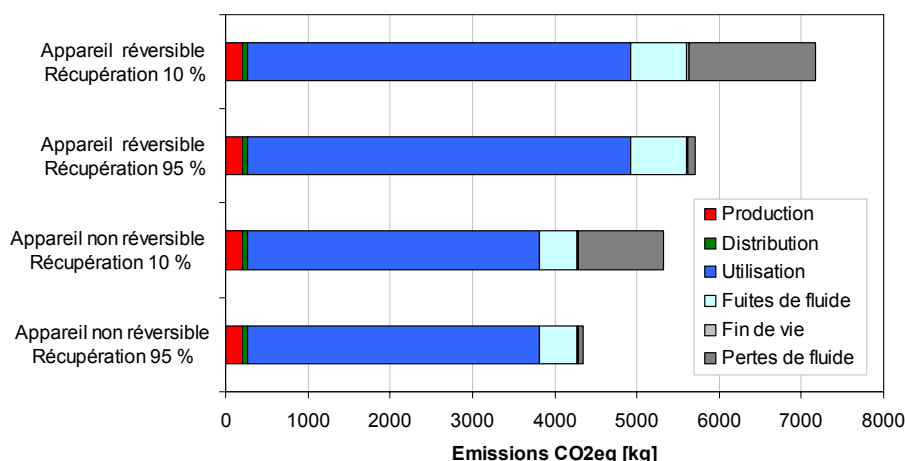


Figure 4.17. Comparaison des émissions de CO_{2eq} en fonction de l'hypothèse de taux de récupération des fluides en fin de vie pour les deux cas de référence

¹¹⁵ Par rapport à la quantité de fluide contenue dans l'appareil en fin de vie.

4.2.3.3. Impact de différents scénarios portant sur la phase d'usage des appareils

Impact des besoins

Il existe une grande disparité concernant les besoins de refroidissement et de chauffage selon les bâtiments et les climats. Comme nous l'avons vu précédemment (Tableau 4.16), les consommations électriques varient de 102 kWh/an (appartement à Trappes) à 1275 kWh/an (bureau à Nice) pour l'appareil non réversible, et de 388 kWh/an (appartement à Nice) à 1208 kWh/an (bureau à Nice) pour l'appareil réversible. Les Figure 4.18 et Figure 4.19 présentent les émissions de GES ainsi que la consommation d'énergie primaire pour différentes configurations.

L'importance de la phase d'usage sur les bilans totaux de consommations et d'émissions est mise en exergue. Dans le cas des GES, la consommation électrique reste la première cause d'émissions devant les fuites de fluide lors de la phase d'usage. Même dans une configuration où les besoins sont très limités (appartement situé à Trappes), 40 % des émissions de CO₂-eq sont liées à l'électricité et les fuites de fluide représentent alors 33 % des émissions totales. La consommation d'électricité reste toujours le premier poste d'émission mais se voit rejointe par les fuites de fluide réfrigérant (phase d'usage de l'appareil).

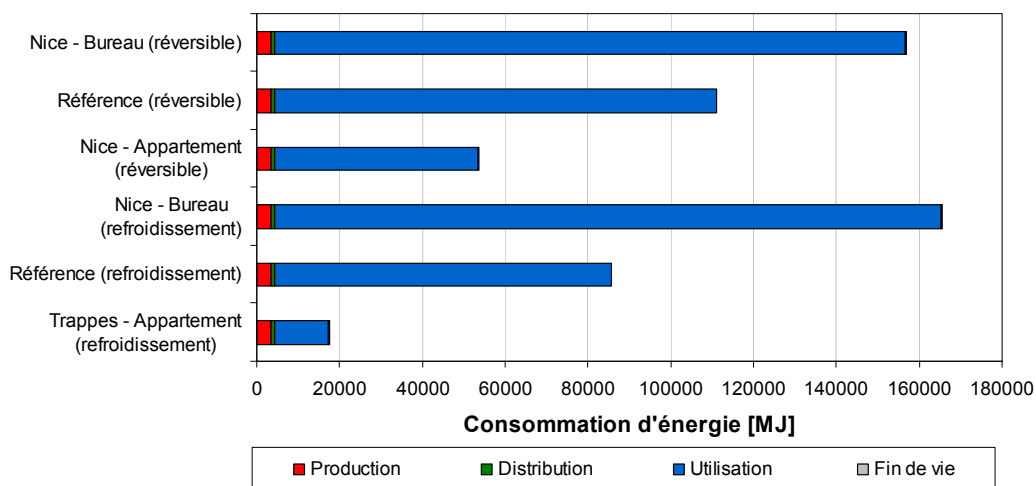


Figure 4.18. Consommation d'énergie primaire des climatiseurs de référence pour différents bâtiments et différents climats

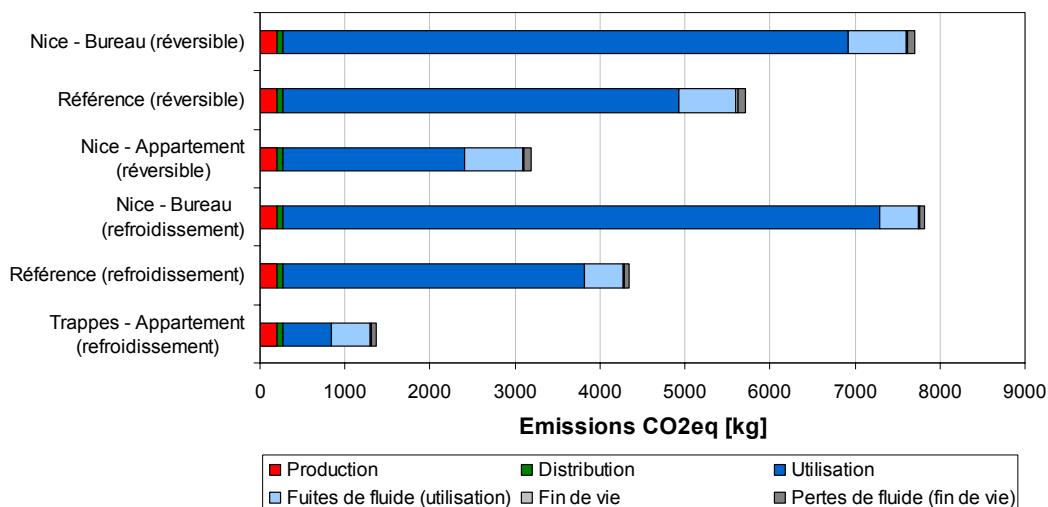


Figure 4.19. Emissions de CO₂-eq des climatiseurs de référence pour différents bâtiments et différents climats

Impact du contenu carbone du kilowattheure électrique

L'outil d'ACV utilisé ici a été réalisé dans un contexte européen et le contenu carbone du kilowattheure électrique consommé correspond à la moyenne du mix européen, soit 460 g de CO₂-eq.

La Figure 4.20 présente le bilan des émissions de CO₂-eq obtenu à partir du mix européen et celui obtenu à partir du mix français (90 g de CO₂-eq par kilowattheure consommé).

La part des émissions due à la consommation d'électricité passe alors d'environ 80 % à 45 %. Si celle-ci reste la première cause d'émissions de GES, elle devient du même ordre de grandeur que les fuites de fluide (phase d'usage) qui représentent 30 à 35 % du bilan total.

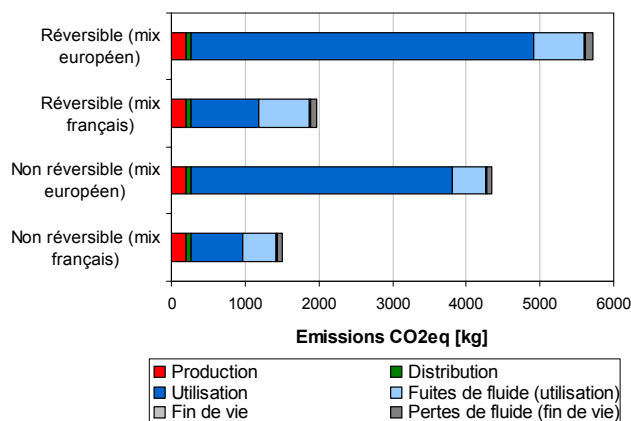


Figure 4.20. Bilan des émissions de CO₂-eq calculé à partir des mix européen et français

4.2.4 Conclusions : potentiels d'amélioration identifiés

Une Analyse du Cycle de Vie des deux appareils de référence définis dans la partie 4.2.1 a été réalisée.

Il ressort de cette ACV que la réduction des consommations d'énergie et des émissions de GES nécessitent de se concentrer en premier lieu sur la réduction des consommations électriques des appareils (efficacité énergétique, ou dans un cadre plus large, réduction des besoins) puis sur le cycle de vie du fluide frigorigène.

Les analyses de sensibilité réalisées montrent que si dans certaines configurations, l'impact des fuites de fluide frigorigène, lors de la phase d'usage, peut être similaire à celui de la consommation d'électricité, il est généralement de moindre ampleur. En ce qui la phase de fin de vie des climatiseurs, il existe une forte incertitude quant au taux de récupération des fluides frigorigènes. Dans le cas où celui-ci serait faible, la phase de fin de vie deviendrait alors une source importante d'émissions de GES, avec environ 20 % des émissions totales.

4.3 Perspectives d'amélioration des performances environnementales des appareils

L'Analyse en Cycle de Vie a montré que dans le but de réduire les consommations d'énergie et les émissions de GES, il fallait se concentrer en premier lieu sur la réduction des consommations électriques des appareils (efficacité énergétique, ou dans un cadre plus large, réduction des besoins) puis sur le cycle de vie du fluide frigorigène.

L'objectif de cette partie consiste à étudier des actions d'amélioration de l'efficacité énergétique des appareils et de réduction des émissions de fluide frigorigène. Outre les gains environnementaux, nous devons aussi évaluer les surcoûts engendrés par ces améliorations. Pour ce faire, il est nécessaire, dans un premier temps, de caractériser les coûts associés aux appareils de référence.

4.3.1 Détermination des coûts associés aux cas de référence

Dans le cadre de la thèse, des analyses en coût global seront réalisées (chapitre 5). Nous nous attachons donc, dès maintenant, à caractériser les appareils de référence retenus en termes de coût d'achat mais aussi de coût d'installation et de coûts de maintenance.

4.3.1.1. Incertitudes quant à l'évaluation des coûts

Il existe une incertitude importante, inhérente à l'exercice d'évaluation des coûts. En effet, les coûts de biens remplissant une fonction identique peuvent varier de façon considérable du fait de nombreux facteurs tels que la qualité du produit (esthétisme, options, degré de finition...), les pratiques de vente et d'achat (réduction promotionnelle, mode de paiement utilisé)... Les coûts établis dans cette partie souffrent donc d'incertitudes importantes mais sont supposés pertinents dans l'objectif d'une comparaison de solutions dans un cadre général.

4.3.1.2. Coûts d'achat

Des études de marché ont été réalisées dans le cadre du projet sur l'écoconception des climatiseurs individuels (Rivière et *al.*, 2009). Il est apparu lors de cette étude qu'il n'y avait pas de différence significative, en termes de coût d'achat, entre les appareils réversibles et non réversibles de puissance frigorifique semblable. La part importante des appareils réversibles sur le marché japonais (développements technologiques importants, économies d'échelle), ainsi que la main d'œuvre « bon marché » (notamment en Chine) ont engendrées une baisse importante des coûts de fabrication de ces appareils.

De façon générale, le prix des climatiseurs individuels est moins élevé dans les pays où ils sont fortement répandus. Selon Rivière et *al.* (2009), le prix moyen en Grèce est 140 € par kilowatt de puissance frigorifique quand il s'élève à 350 €/kW en Autriche. Pour la suite de l'étude, nous retenons la valeur moyenne **de 195 € TTC par kilowatt de puissance frigorifique** établie par Rivière et *al.* (2009) pour les appareils européens réversibles et non réversibles.

4.3.1.3. Coûts d'installation

Concernant les coûts d'installation, la seule source disponible (SPON, 2005) considère qu'ils sont de l'ordre de 1000 à 1100 € par appareil de type split en Grande-Bretagne. La valeur de **1000 € par appareil** est retenue par la suite comme coût d'installation.

4.3.1.4. Coûts de maintenance

Selon la norme européenne EN 15459 (CEN, 2006), le coût de la maintenance annuelle pour les climatiseurs est typiquement de l'ordre de 4 % de l'investissement initial (incluant les coûts d'installation). En l'absence de sources supplémentaires, cette valeur est retenue pour la suite de l'étude.

4.3.2 Amélioration de l'efficacité énergétique des climatiseurs : perspectives d'évolution des indices de performances saisonnières

Des indices de performances saisonnières ont été développés dans la partie 4.1. L'objectif est maintenant d'étudier les améliorations envisageables de ces indices, ainsi que les coûts associés. Le coût (ou surcoût par rapport à une situation de référence) est ici considéré comme le prix d'achat. Des calculs en coûts globaux (sur la durée de vie) seront effectués au chapitre 5 lorsque seront abordés l'évaluation de différentes mesures d'amélioration du confort d'été sous l'angle de l'Analyse Coût-Bénéfice.

4.3.2.1. Détermination et caractérisation d'un portfolio d'options d'amélioration des performances

Dans un premier temps, nous avons défini un portfolio d'actions applicables aux cas de référence dans le but d'améliorer leur efficacité énergétique. Une description détaillée des options répertoriées dans le Tableau 4.19 est disponible dans Rivière et *al.* (2009).

De façon générale, ces options peuvent être réparties en cinq catégories :

- utilisation de composants plus efficaces (ventilateurs, détendeur, compresseur) en augmentant leur efficacité énergétique en tant que telle ou en améliorant leur contrôle,
- augmentation des surfaces des échangeurs (extérieurs et intérieurs),
- amélioration des performances lors du dégivrage et à basses températures,
- réduction des consommations électriques liées à la résistance de carter,
- réduction des consommations électriques en mode veille.

Les surcoûts engendrés par la mise en place de ces actions d'amélioration ont été évalués par les fabricants dans le cadre du projet sur l'écoconception des climatiseurs individuels (Rivière et *al.*, 2009). La structure de formation des coûts en Europe, étudiée dans ce même projet, permet de déduire les surcoûts pour l'acheteur (taxes comprises¹¹⁶) à partir des surcoûts fournis par les fabricants.

Tableau 4.19. Portfolio d'options d'amélioration de l'efficacité énergétique des climatiseurs

Options	Description		Appareil non réversible	Appareil réversible
CP1	Utilisation d'un compresseur efficace (ARI, 2004)	EER = 3	X	X
CP2		EER = 3,2	X	X
CP3		EER = 3,4	X	X
INV AC	Compresseur à vitesse variable	Moteur AC	X	X
INV DC		Moteur DC	X	X
ALL DC	INV DC + Ventilateurs à vitesse variable		X	X
HE0	Augmentation de la surface des deux échangeurs de chaleur et des débits des ventilateurs associés	10 %	X	
HE1		20 %	X	X
HE2		40 %	X	X
HE3		60 %	X	X
HE4		80 %	X	X
HE5		100 %	X	X
TXV	Détendeur thermostatique		X	X
EXV	Détendeur électronique		X	X
DEF	Amélioration du contrôle du dégivrage			X
Sb	Réduction des consommations de veille		X	X
CK1	Réduction de la puissance électrique de la résistance de carter			X
CK2	Amélioration du contrôle de la résistance de carter			X

¹¹⁶ Par la suite, nous supposons que les prix hors taxes sont égaux à 80 % des prix TTC des produits.

4.3.2.2. Perspectives d'évolution des performances saisonnières des cas de référence

Simulation des options d'amélioration appliquées individuellement

Les appareils de référence précédemment présentés sont simulés afin d'étudier l'impact sur leur efficacité énergétique, des options d'amélioration répertoriées dans le Tableau 4.19.

Le logiciel utilisé est celui développé par le DOE (Department of Energy) pour la conception de pompes à chaleur (DOE/ORNL, 2009).

Les indices de performances saisonnières sont ainsi calculés pour chacune des options. La Figure 4.21 présente les résultats pour l'appareil non réversible.

Les options permettant les gains les plus importants sont celles qui consistent à améliorer le contrôle du compresseur et à augmenter les surfaces des échangeurs.

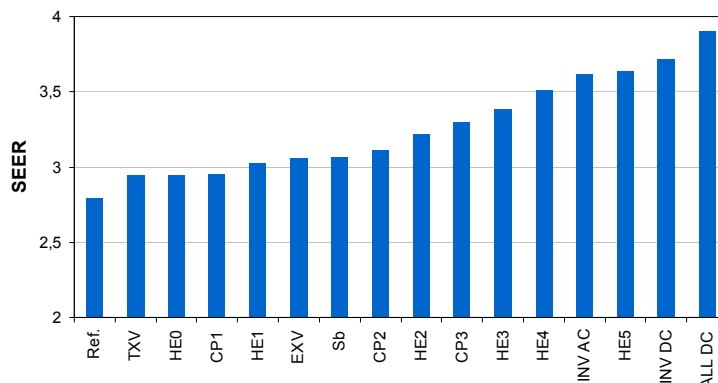


Figure 4.21. Impact des options d'amélioration sur le SEER de l'appareil de référence non réversible

Simulation des options d'amélioration appliquées par ordre d'efficacité économique

Les résultats précédents, associés aux besoins de bâtiments (simulés par Rivière et *al.* (2009)), permettent d'obtenir les économies d'électricité engendrées par la mise en place d'une option d'amélioration. En utilisant des hypothèses économiques représentatives du contexte européen, ces options ont été classées par ordre d'efficacité économique en se basant sur le critère du coût global. Les options d'amélioration sont ensuite appliquées aux cas de référence, une par une, par ordre d'efficacité économique.

■ Evolution des performances en refroidissement

Concernant les performances en refroidissement, les résultats obtenus à partir des cas de référence réversible et non réversible sont présentés Figure 4.22. La mise en place de toutes les options d'amélioration permet d'atteindre un SEER de 6,7 pour l'appareil à refroidissement seul, et de 7,1 pour l'appareil réversible. Le prix de l'appareil se trouve alors augmenté d'un facteur 2. Pour les deux types d'appareil, une augmentation du prix de seulement 10 % permet d'obtenir une amélioration du SEER de l'ordre de 35 - 40 %.

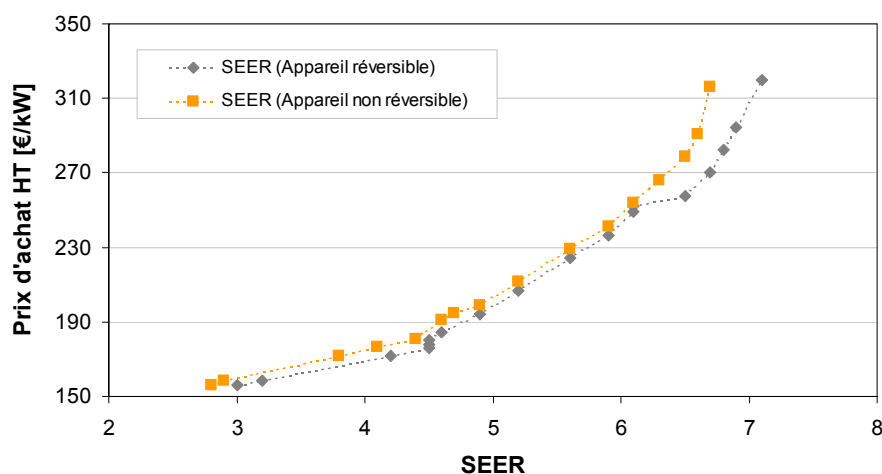


Figure 4.22. Prix d'achat Hors Taxe des appareils en fonction de leur indice de performances saisonnières en mode refroidissement (prix donnés en fonction de la puissance frigorifique).

▪ Evolution des performances en chauffage

Concernant les performances en mode chauffage, les résultats obtenus à partir du cas de référence réversible sont présentés sur la Figure 4.23. La mise en place de toutes les options d'amélioration permet d'atteindre des SCOP de 3,2 (zone Helsinki), 4,8 (zone Strasbourg) et 6,4 (zone Athènes) alors que ceux du cas de référence étaient respectivement de 2, 2,7 et 2,8 soit des augmentations de 60 %, 80 % et 130 %. Le prix d'achat de l'appareil est alors augmenté d'un facteur 2. Deux raisons principales expliquent le potentiel d'amélioration limité pour la zone d'Helsinki : la difficulté d'améliorer les performances de l'appareil à des températures faibles et l'impact limité des améliorations à charge partielle dans un climat où le nombre d'heures de fonctionnement à pleine charge est important.

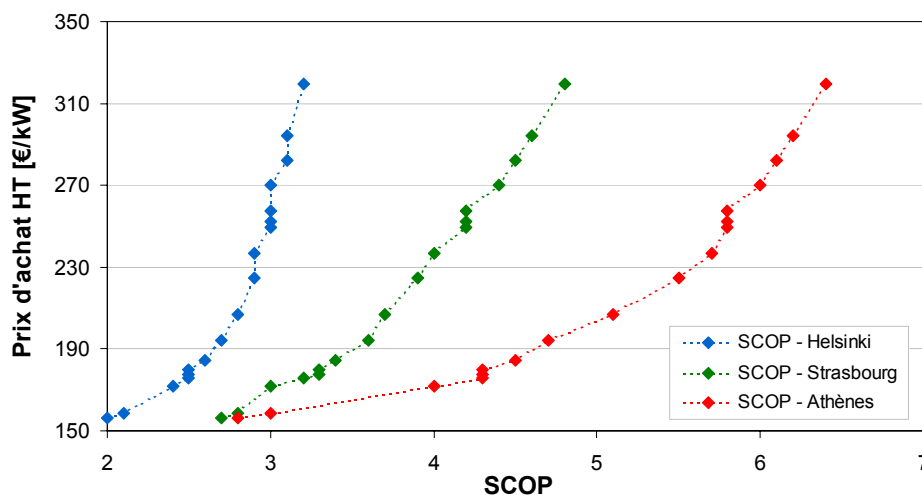


Figure 4.23. Prix d'achat Hors Taxe des appareils en fonction de leurs indices de performances saisonnières en mode chauffage¹¹⁷ (prix donnés en fonction de la puissance frigorifique).

Toutes les actions d'amélioration permettent d'améliorer à la fois le SEER et le SCOP. Ainsi, pour un appareil coûtant 170 €/kW (augmentation de 10 % par rapport au cas de référence), le SEER est augmenté de 40 % et le SCOP de 11 % (pour le climat de Strasbourg).

Bien-fondé des coûts obtenus

L'évaluation des surcoûts liés à l'amélioration de l'efficacité énergétique des climatiseurs, repose sur une approche de reconstruction des coûts à partir d'une étude technico-économique. La comparaison de nos résultats à des données collectées sur différents marchés permet d'évaluer la pertinence de notre travail.

La Figure 4.24 présente les prix des climatiseurs observés sur le marché européen (essentiellement au Royaume-Uni) en 2007 et sur les marchés chinois et japonais en 2006. Pour ces deux derniers marchés, les prix rapportés ici proviennent de données collectées par Ellis (2007) dans les points de vente japonais et sur les sites de vente par Internet chinois. L'une des courbes est une agrégation des résultats observés, l'autre corrige les prix en fonction des fonctionnalités et options dont sont dotés certains appareils (telles que le filtrage de l'air). Cette dernière courbe est donc censée mieux caractériser le coût de l'efficacité énergétique.

Les résultats de notre travail aboutissent à une évolution des coûts (en fonction de l'efficacité) comparable à celle rencontrée en Asie. Cependant, les prix que nous avons déterminés sont beaucoup plus faibles que ceux observés en Europe et beaucoup plus élevés que ceux des marchés asiatiques. En effet, si les produits peu efficaces sont vendus en Europe à des prix similaires au marché chinois et japonais, les prix d'appareils dont l'EER dépasse 3, sont environ deux fois plus importants. Il est donc vraisemblable que les constructeurs asiatiques pratiquent de larges marges sur le marché européen.

¹¹⁷ Comme expliqué en Partie 4.1.2, l'indice SCOP est défini pour trois climats.

Avec la mise en place de normes plus exigeantes et la suppression des produits peu efficaces et à bas prix, il est fort probable que la concurrence portera sur des gammes de produits plus efficaces et que les fabricants commenceront à réduire les prix de ces derniers.

Notre travail sous-évalue le prix des appareils efficaces actuellement vendus en Europe. Cependant, l'observation des marchés asiatiques laisse à penser que les prix sont fortement susceptibles de diminuer dans les années à venir et de se rapprocher de nos estimations.

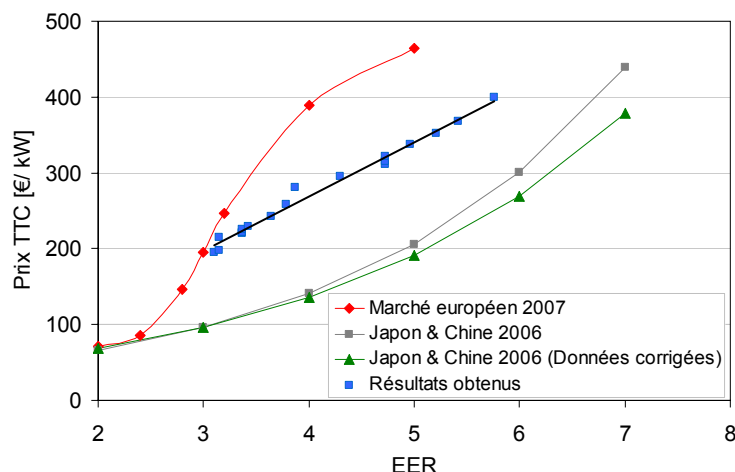


Figure 4.24. Evolution des prix des climatiseurs en fonction de l'EER : résultats de cette étude et données observées sur les marchés européens, chinois et japonais

4.3.3 Réduction des impacts liés au cycle de vie des fluides frigorigènes

Différentes solutions permettent de diminuer les émissions de GES liées au cycle de vie des fluides frigorigènes : la réduction des taux de fuite pendant la phase d'utilisation, l'emploi de fluides à faible PRG, ou encore, l'augmentation du taux de récupération de ces fluides en fin de vie. Ces deux dernières possibilités sont étudiées dans cette partie.

4.3.3.1. Utilisation de fluides à faible Pouvoir de Réchauffement Global

En ce qui concerne les climatiseurs individuels de type Split, toutes les unités vendues aujourd'hui fonctionnent avec un HFC et la grande majorité d'entre elles au R410A. Le CO₂ peut cependant être utilisé comme fluide frigorigène (avec par définition, un PRG de 1).

Si le CO₂ permet de réduire les émissions directes de GES, il est, à l'heure actuelle, difficile de conclure quant aux conséquences de son utilisation sur l'efficacité énergétique des appareils. Les recherches menées sur ce sujet débouchent sur des résultats contradictoires. Ainsi, selon Ortiz et al. (2003), l'utilisation du CO₂ réduirait fortement les performances énergétiques des appareils et les meilleurs technologies actuellement disponibles permettraient juste d'atteindre des EER et des COP d'environ 3,5 (contre des valeurs de l'ordre de 5-6 pour les appareils fonctionnant au R410A). Au contraire, Jakobsen et al. (2006) ont, quant à eux, développé un prototype fonctionnant au CO₂ et ayant des performances énergétiques équivalentes aux meilleurs produits disponibles sur le marché en 2005.

L'utilisation du CO₂ comme fluide frigorigène ne semble pas être une solution technique mature et les travaux de recherche actuels ne permettent pas de conclure quant à sa pertinence. Face aux incertitudes qui pèsent à la fois sur les avantages environnementaux et sur l'évolution des coûts de cette technologie émergente, celle-ci ne sera pas traitée dans la suite de l'étude.

4.3.3.2. Augmentation du taux de récupération des fluides en fin de vie

L'amélioration de la récupération des fluides frigorigènes en fin de vie a un coût non négligeable car elle nécessite notamment l'emploi d'entreprises spécialisées pour la récupération, l'utilisation de matériels adéquats pour le confinement et le transport du gaz, et l'exploitation de filières dédiées au traitement (incinération, régénération).

Dans le cadre de la Directive DEEE, une taxe doit être payée par l'acheteur lors de l'achat d'équipements électriques et électroniques afin de contribuer au financement de systèmes de gestion des déchets en fin de vie. En France, celle-ci s'élevait en 2009 à 13 € pour un réfrigérateur ou un climatiseur individuel contre 6 € par exemple pour un four domestique. En raison du faible volume de climatiseurs aujourd'hui traités en fin de vie, cette taxe rend surtout compte du coût de traitement des réfrigérateurs (ou appareils similaires) dont les circuits de fluides frigorigènes sont étanches contrairement aux appareils objets de notre étude.

Aussi, le montant de la taxe japonaise mise en place dans le cadre de la loi sur le recyclage des appareils ménagers (JMETI, 2002) paraît plus représentative du coût de traitement d'un climatiseur individuel en fin de vie. Cette dernière s'élevait à environ 3 500 Yen en 2005 (DTI, 2005), c'est à dire approximativement 25 €.

Même si les incertitudes sont importantes¹¹⁸, cette valeur (25 €/appareil) est retenue comme ordre de grandeur du coût de récupération des fluides en fin de vie. En tenant compte de la quantité de fluide initiale¹¹⁹ et des fuites lors de l'usage des climatiseurs¹²⁰, le coût de la récupération de fluides en fin de vie est de l'ordre de 40 – 50 € par tonne de CO₂-eq non émise (37 €/tCO₂-eq pour l'appareil réversible et 55 €/tCO₂-eq pour l'appareil à refroidissement seul).

¹¹⁸ Ce coût prend en compte tout le traitement de l'appareil en fin de vie et non uniquement la récupération du fluide. La taxe japonaise payée par les acheteurs ne reflète pas la totalité des coûts de la filière. Le contexte japonais diffère du contexte européen, les filières de recyclage y sont plus développées.

¹¹⁹ Pour rappel : 0,8 kg pour l'appareil non réversible et 1,2 kg pour l'appareil réversible.

¹²⁰ 3 % par an.

4.4 Conclusion : retour sur le travail présenté dans ce chapitre et sur son contexte général

La réalisation de l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) des climatiseurs nous aura montré que la réduction des consommations d'énergie et des émissions de GES nécessitait de se concentrer en premier lieu sur la réduction des consommations électriques des appareils (efficacité énergétique, ou dans un cadre plus large, réduction des besoins) puis sur le cycle de vie du fluide frigorigène. Par la suite nous avons étudié des actions d'amélioration de l'efficacité énergétique des appareils et de réduction des émissions de fluide frigorigène. Outre les gains environnementaux, les surcoûts engendrés par ces améliorations sont maintenant disponibles.

En marge de ce chapitre 4, nous avons participé à deux projets susceptibles de contribuer à l'évolution du contexte de la climatisation individuelle en Europe.

La méthode de caractérisation des performances énergétiques des appareils de climatisation (présentée en partie 4.1) a ainsi été réalisée dans le cadre d'une participation au groupe de travail TC 113/WG 7 mis en place par le Comité Européen de Normalisation dans le but de composer une nouvelle norme d'évaluation des performances énergétiques qui ne soit pas basée uniquement sur les performances nominales des appareils (le projet de norme prEN 14825 est actuellement en enquête publique).

Le travail présenté dans le présent chapitre, en termes d'évaluation des impacts environnementaux et de détermination des potentiels d'amélioration, s'appuie sur l'étude préparatoire portant sur l'écoconception des climatiseurs individuels (Rivière *et al.*, 2009) que nous avons réalisé dans le cadre de la directive européenne sur l'écoconception des produits consommant de l'énergie (CE, 2005). La directive recherche, entre autre, l'amélioration de l'efficacité énergétique des produits, la diminution des consommations d'eau, la diminution du bruit, l'augmentation du taux de recyclabilité du produit et/ou de ses composants, en minimisant l'impact environnemental des produits sur leur cycle de vie. En ce qui concerne les climatiseurs individuels, l'étude préparatoire devrait aboutir sur l'adoption, en Europe, d'exigences minimales de performance environnementale (voir le document de travail du forum consultatif¹²¹ (CE, 2009)). Le travail effectué dans cette étude a par ailleurs été présenté dans un article que nous avons soumis au journal *Energy Policy* et retranscrit en Annexe 4.

¹²¹ Dans le cadre de cette directive, le forum consultatif contribue en particulier à la définition et à la révision des exigences d'écoconception, au contrôle de l'efficacité des mécanismes de surveillance du marché mis en place, et à l'évaluation des accords volontaires et autres mesures d'autorégulation. Ce forum regroupe des représentants des États membres et de toutes les parties intéressées par le produit/groupe de produits en question (le secteur de production, les syndicats, les opérateurs commerciaux, les détaillants, les importateurs, les associations de protection de l'environnement, les organisations de consommateurs...).

Chapitre 5. Evaluation du potentiel de réduction des impacts environnementaux liés au confort d'été

Tables des matières

CHAPITRE 5. EVALUATION DU POTENTIEL DE REDUCTION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX LIES AU CONFORT D'ETE	195
TABLES DES MATIERES	197
INTRODUCTION	199
5.1 APPROCHE ADOPTEE POUR L'EVALUATION ECONOMIQUE DES ACTIONS D'AMELIORATION DU CONFORT D'ETE	201
5.1.1 ASPECTS METHODOLOGIQUES RELATIFS A L'EVALUATION DES COUTS ET AVANTAGES	201
5.1.2 PRESENTATION DE L'APPROCHE D'EVALUATION TECHNICO-ECONOMIQUE DES SOLUTIONS D'AMELIORATION DU CONFORT D'ETE	205
5.2 ANALYSE COUT-BENEFICE « PRIVEE » D'ACTIONS D'AMELIORATION DU CONFORT D'ETE	209
5.2.1 DESCRIPTION DE LA SITUATION DE REFERENCE	209
5.2.2 RESULTATS DE L'ANALYSE COUT-BENEFICE « PRIVEE » DES ACTIONS D'AMELIORATION DU CONFORT ESTIVAL	211
5.2.3 LUTTER CONTRE LA RATIONALITE LIMITEE DES AGENTS ECONOMIQUES PRIVES : L'EXEMPLE DES EXIGENCES MINIMALES DE PERFORMANCE PORTANT SUR LES APPAREILS DE CLIMATISATION	221
5.2.4 L'ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE : LES TRANSFORMATIONS A PREVOIR CONCERNANT LE CONFORT D'ETE	224
5.3 ANALYSE COUT-BENEFICE SOCIETALE D'ACTIONS D'AMELIORATION DU CONFORT D'ETE	229
5.3.1 SYNERGIES ET CONFLITS ENTRE POINTS DE VUE PRIVE ET SOCIETAL	229
5.3.2 REDUCTION DES CONSOMMATIONS D'ENERGIE LIEES AU CONFORT D'ETE, UNE ANALYSE COUT-EFFICACITE	236
5.3.3 PERSPECTIVE D'EVOLUTION DES RESULTATS DE L'ACB SOCIETALE A L'HORIZON 2050	241
5.4 ELEMENTS DE PROSPECTIVE QUANT AUX CONSOMMATIONS ENERGETIQUES ET AUX EMISSIONS DE GES LIEES A LA CLIMATISATION INDIVIDUELLE EN FRANCE	245
5.4.1 DETERMINATION D'UN SCENARIO TENDANCIEL POUR LA FRANCE	245
5.4.2 POTENTIEL DE REDUCTION DES CONSOMMATIONS A L'ECHELLE DU TERRITOIRE	252
5.4.3 LA CONTRIBUTION DU CONFORT D'ETE DANS LES SCENARIOS FACTEUR 4	255
5.5 ENSEIGNEMENTS ET RECOMMANDATIONS TIRES DU PRESENT CHAPITRE	257
5.5.1 RESULTATS DE L'ANALYSE COUT-BENEFICE D'ACTIONS D'AMELIORATION DU CONFORT D'ETE A L'ECHELLE DU BATIMENT	257
5.5.2 QUANTIFICATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX LIES A LA CLIMATISATION INDIVIDUELLE	258
5.5.3 RECOMMANDATIONS	260

Introduction

L'objectif final du présent chapitre est de réaliser un travail prospectif afin, d'une part, d'estimer l'impact que pourrait avoir la climatisation individuelle sur les consommations d'énergie et les émissions de GES en France à horizon 2050 et, d'autre part, d'établir des recommandations sur les solutions à privilégier en vue de réduire ces impacts. Pour ce faire, nous avons choisi, dès le chapitre 1, d'adopter une approche ascendante consistant à évaluer les performances d'actions à l'échelle du bâtiment pour parvenir à des résultats généraux à l'échelle du territoire.

Dans un premier temps, nous présenterons l'approche et les hypothèses retenues pour l'évaluation d'actions d'amélioration du confort d'été. Ensuite, sur la base des résultats obtenus aux chapitres 3 et 4, nous procéderons à l'analyse technico-économique de ces actions à l'échelle du bâtiment. Ce travail nous permettra d'établir des recommandations sur les solutions à privilégier en vue de diminuer les impacts liés au confort d'été, à la fois dans le contexte actuel et dans un contexte de changement climatique et de hausse du prix des énergies.

Enfin, nous réaliserons une étude prospective à l'échelle du territoire français et étudierons différents scénarios concernant le développement de la climatisation individuelle et les impacts qui lui sont associés.

5.1 Approche adoptée pour l'évaluation économique des actions d'amélioration du confort d'été

A ce stade du travail de thèse, nos connaissances concernant les performances économiques des actions d'amélioration du confort d'été, se limitent à un ensemble de valeurs relatives à l'achat, la maintenance, et la durée de vie des différentes solutions (chapitres 3 et 4). Dans cette partie, nous revenons sur certains aspects méthodologiques relatifs à l'évaluation des coûts, puis définissons l'approche d'évaluation technico-économique adoptée pour la suite de l'étude en spécifiant les hypothèses économiques manquantes.

5.1.1 Aspects méthodologiques relatifs à l'évaluation des coûts et avantages

Certains aspects méthodologiques relatifs à l'évaluation des coûts ont été abordés succinctement au chapitre 1. Nous y avons notamment expliqué les différences entre Analyse Coût Efficacité (ACE) et Analyse Coût Bénéfice (ACB) puis présenté une terminologie pour caractériser les différents coûts susceptibles d'être rencontrés lors de ces analyses. L'objet de cette partie est de présenter les notions de coût total et de coût marginal, puis de revenir sur les points de vue pouvant être adoptés lors d'une analyse technico-économique.

5.1.1.1. Présentation du Coût Global Actualisé (CGA) ou Coût Total

La norme ISO 15686-5 (ISO, 2008), qui présente les fondements et la méthode de calcul de l'approche en coût global, exprime le Coût Global Actualisé (CGA) comme indiqué par l'équation (1.2). Ainsi, le calcul du CGA est une méthode d'évaluation économique permettant de prendre en compte l'impact des coûts différés dans le temps tels que ceux liés à la consommation d'énergie.

$$CGA = I_0 + \sum_{i=1}^N \frac{D_i - R_i}{(1+a)^i} + \sum V_R \quad (5.1)$$

Avec : I_0 , le montant de l'investissement à l'année 0,

D_i , les dépenses de l'année i ,

R_i , les revenus de l'année i ,

$\sum V_R$, somme des valeurs résiduelles,

a , le taux d'actualisation,

N , période d'analyse (en années).

La période d'analyse représente la durée pendant laquelle les coûts différés dans le temps sont pris en compte dans le calcul du CGA. La valeur résiduelle d'une action est quant à elle définie comme la somme actualisée des coûts et bénéfices engendrés par cette action et attendus après la période d'analyse¹²² (équation (5.2)). Elle doit notamment être considérée lors de comparaisons d'actions ayant des durées de vie différentes afin de ne pas pénaliser les plus pérennes.

$$V_R = \sum_{i=N+1}^{DV} \frac{D_i - R_i}{(1+a)^i} \quad (5.2)$$

Avec : V_R : valeur résiduelle d'une action,

D_i : les dépenses de l'année i ,

R_i : les revenus de l'année i ,

a : le taux d'actualisation,

DV : la durée de vie d'une action,

N : la période d'analyse.

¹²² La valeur résiduelle peut être négative s'il y a un coût de remise en état (dépollution par exemple).

5.1.1.2. Coûts totaux, coûts moyens et coûts marginaux

Dans le but de comparer différentes options de réduction des consommations d'énergie ou des émissions de GES, il est possible de se baser directement sur le CGA mais aussi sur deux notions dérivées du CGA que sont le coût moyen et le coût marginal.

Coût total (CGA)

Le raisonnement en coût total consiste à comparer différentes solutions sur la base du CGA. Celles engendrant les bénéfices les plus importants (ou les coûts les plus faibles) seront à favoriser¹²³.

Coût moyen

Les coûts moyens sont à utiliser lorsque l'on évalue des options relativement à un objectif donné, tel que la production d'un objet ou la réduction des consommations d'énergie. Dans ce dernier cas, ils sont définis comme le coût nécessaire à l'économie d'une unité d'énergie ou de pollution, intégrant ainsi une quantification de l'efficacité économique des actions. Comme l'indique l'équation (5.3), le coût moyen est égal au ratio entre le coût total d'une action par rapport à la situation de référence, et le nombre d'unités économisées par rapport à cette même situation de référence (tonnes de polluant évitées, énergie économisée...).

$$C_{Moyen} = \frac{\Delta CGA_{(ref)}}{\Delta E_{(ref)}} \quad (5.3)$$

Avec : C_{Moyen} , le coût moyen en €/kWh,
 $\Delta CGA_{(ref)}$, le coût total de l'action par rapport à la situation de référence en €,
 $\Delta E_{(ref)}$, l'énergie économisée par rapport à la situation de référence en kWh.

Coût marginal

De même que pour le coût moyen, le coût marginal est à utiliser lorsque l'on évalue des options relativement à un objectif donné. Dans le cas de la réduction des consommations d'énergie et des émissions de GES, le coût marginal est défini comme le coût total à dépenser pour réduire les consommations d'énergie ou les émissions de polluant d'une unité additionnelle¹²⁴ (tonne de polluant, kilowattheure électrique...) (5.4).

$$C_{Marginal} = \frac{\Delta CGA}{\Delta E} \quad (5.4)$$

Avec : $C_{Marginal}$, le coût marginal en €/kWh,
 ΔCGA , la différence de coût total par rapport au niveau d'efficacité antérieur en €,
 ΔE , l'énergie économisée par rapport au niveau d'efficacité antérieur en kWh.

Comparaison sur un exemple

Afin de bien comprendre les différences entre les notions de coût marginal et de coût moyen, nous nous appuyons sur l'exemple de deux actions mises en place dans un bâtiment climatisé : l'installation d'un climatiseur (action A) qui a un coût total de 4 €/m² pour une économie engendrée de 2 kWh/m² et l'amélioration de l'enveloppe du bâtiment (action B) qui permet de réduire la consommation d'énergie de 3 kWh/m² pour un coût total de 8 €/m². D'autre part, l'économie d'énergie engendrée par la combinaison des deux actions est égale à 3,5 kWh/m² pour un coût total de 12 €/m².

¹²³ A titre d'exemple, la recherche du CGA minimum (du point de vue des utilisateurs finals) est le critère de détermination des exigences minimales en matière d'efficacité énergétique selon la Directive européenne sur l'éco-conception des appareils consommateurs d'énergie (CE, 2005).

¹²⁴ Il peut aussi être défini comme la dérivée du coût total par rapport à la quantité de pollution ou d'énergie économisée.

La Figure 5.1 présente les coûts moyens des actions A et B ainsi que de la combinaison des deux actions (AB). Cette approche met en valeur l'efficacité économique des différentes possibilités et montre qu'en l'absence d'un objectif d'économie, l'action A est à favoriser.

La Figure 5.2 présente les coûts marginaux liés à la mise en place de l'action A, puis de l'action B à partir du moment où l'action A a été installée. L'action B permet ainsi d'économiser 1,5 kWh/m² supplémentaire au coût de 5,3 € par kilowattheure économisé.

Les coûts moyen et marginal sont à utiliser lorsque l'on évalue des options relativement à un objectif donné. Les avantages du raisonnement basé sur les coûts marginaux sont de réduire l'influence de la situation de référence¹²⁵, puisque ce coût est calculé en fonction du niveau d'efficacité antérieur, et d'établir le chemin permettant d'obtenir des économies d'énergie au moindre coût.

La connaissance des coûts marginaux est donc fondamentale dans le cas d'optimisations sous contrainte de budget, notamment lorsque l'on souhaite fixer des objectifs d'économie ou de dépollution à atteindre et décider des actions à entreprendre. Ainsi, dans notre exemple, toute action permettant d'économiser de l'énergie à un coût inférieur à 5,3 €/kWh devra être mise en place avant l'action B.

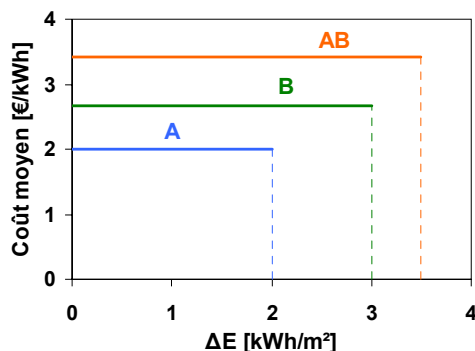


Figure 5.1. Coût moyen en fonction du potentiel d'économie d'énergie

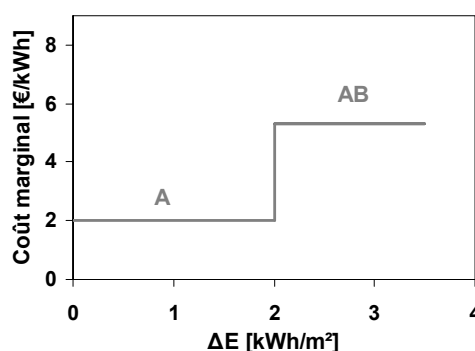


Figure 5.2. Coût marginal pour la mise en place successive des actions A et B

5.1.1.3. Construction de courbes de réduction à partir des coûts marginaux

La pratique habituelle consiste à construire des courbes de coûts de réduction (présentées chapitre 1) à partir des coûts marginaux en considérant que les mesures sont mises en place par ordre d'efficacité économique. Aussi, dans l'exemple précédent, l'action A étant la plus efficace, l'action B ne sera pas considérée individuellement.

Stoft (1995) a montré que ce mode de construction n'était pas optimal et qu'une fois l'action la plus efficace placée sur la courbe, il fallait de nouveau considérer toutes les actions prises individuellement ou au sein d'un ensemble d'action.

Dans l'exemple précédent, l'action B, seule, économisera 1 kWh de plus que l'action A au coût de 4 €/kWh. La Figure 5.3 montre les deux types de courbes basées sur les coûts marginaux : une courbe séquentielle où les actions sont mises en place par ordre d'efficacité économique, une courbe « optimisée » qui considère l'action B seule, même si l'action A est au départ plus efficace.

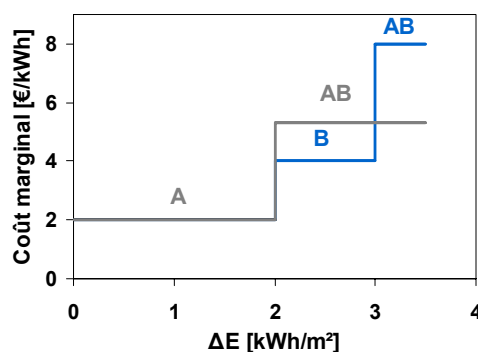


Figure 5.3. Courbes de réduction séquentielle (grise) et « optimisée » (bleue)

¹²⁵ Souvent controversée ou sujette à des incertitudes.

Il s'avère que la courbe séquentielle n'est pas optimale. En effet, si l'on souhaite réaliser des mesures permettant d'économiser de l'énergie à un coût inférieur à 5 €/kWh, la première courbe indiquera qu'il faut se concentrer sur l'action A alors que la mesure B est en réalité plus appropriée.

La méthode adéquate pour construire une courbe de réduction consiste donc à considérer toutes les actions permettant d'économiser une quantité plus importante que le niveau atteint avec les actions déjà mises en place, et à sélectionner celle ayant le coût marginal le plus faible.

5.1.1.4. Les points de vue privé et sociétal

Les résultats d'une évaluation technico-économique diffèrent selon le point de vue adopté.

Une évaluation réalisée du point de vue privé repose sur les coûts pris en compte dans le processus de décision d'agents économiques privés. Ces coûts, dits généralisés¹²⁶, comprennent les coûts de biens ou services marchands et ceux de biens ou services non marchands tels que le confort. L'évaluation des dépenses réelles s'appuie sur les prix du marché (et les évolutions envisagées), celle des services non marchands requiert une méthode de monétisation telle que celles développées au chapitre 3.

Une évaluation effectuée du point de vue sociétal s'évertue à tenir compte de l'ensemble des impacts (positifs ou négatifs) supportés par la société dans son entier. Selon Lebègue (2005), le décideur public, ne peut, comme le fait l'investisseur privé, se limiter à l'examen de la rentabilité purement financière, laquelle exprime l'intérêt d'un projet par la seule prise en compte des flux financiers en termes de dépenses et recettes. Le décideur public doit s'attacher à la rentabilité socio-économique qui traduit l'intérêt d'un projet pour la collectivité dans son ensemble en faisant intervenir d'autres éléments que les seuls flux financiers : sécurité, pollutions et nuisances, raréfaction de certains biens naturels tels que ressources énergétiques ou matières premières, progrès scientifique et technologique escomptés... La réalisation d'une évaluation technico-économique du point de vue sociétal nécessite :

- de corriger les prix du marché des interventions de l'Etat (les incitations sont ajoutées, les impôts sont retranchés) qui ne représentent pas une internalisation de coûts liés à la consommation du bien ou du service considéré,
- d'intégrer les coûts externes,
- et d'utiliser un taux d'actualisation social donnant plus de poids aux coûts envisagés à moyen et long terme.

Dans le cas de l'étude de mesures de réduction des consommations d'énergie, l'adoption du point de vue sociétal, qui nécessite l'utilisation d'un taux d'actualisation plus faible et l'intégration des externalités, aboutit généralement à un optimum technico-économique qui correspond à des économies d'énergies et des investissements plus importants que ce à quoi l'on serait parvenu en adoptant le point de vue privé. La Figure 5.4 présente schématiquement les optimums sociétal et privé en fonction des niveaux d'investissement réalisés et du volume d'économies d'énergie. L'optimum sociétal concorde rarement avec les meilleures technologies disponibles qui présentent des coûts excessifs face aux bénéfices escomptés.

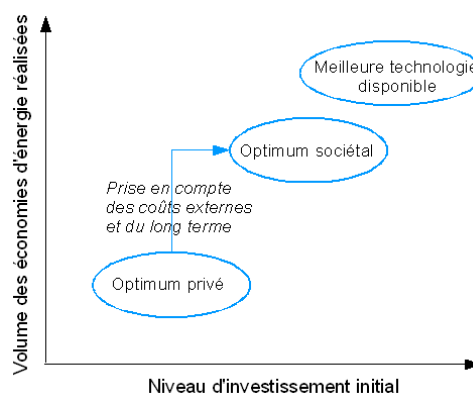


Figure 5.4. Représentation des optimums privé et sociétal en fonction du volume d'économies d'énergie engendré et du niveau d'investissement initial

¹²⁶ Voir chapitre 1.

5.1.2 Présentation de l'approche d'évaluation technico-économique des solutions d'amélioration du confort d'été

5.1.2.1. Approche générale

Etude des actions d'amélioration du confort d'été du point de vue privé

Dans un premier temps, nous adopterons le point de vue privé pour étudier les actions d'amélioration du confort d'été. Le CGA sera calculé pour l'ensemble des actions envisageables, ce qui nous permettra de déterminer les mesures optimales du point de vue privé tant dans les bâtiments climatisés que dans ceux qui ne le sont pas. Dès lors, nous mènerons une première analyse concernant les économies d'énergie pouvant être réalisées à partir des solutions optimales du point de vue privé. Enfin, un premier exercice de prospective consistera à étudier l'influence du changement climatique et de l'augmentation du prix des énergies sur le bilan économique des agents privés et donc sur les tendances à venir, notamment en ce qui concerne le développement de la climatisation individuelle.

Etude des actions d'amélioration du confort d'été du point de vue sociétal

Dans un deuxième temps, nous adopterons le point de vue sociétal afin de comparer, sur la base du CGA, les différentes actions d'amélioration du confort d'été. Ceci nous permettra de déterminer les actions à favoriser du point de vue de la société et d'étudier les conflits et synergies éventuels avec les configurations optimales du point de vue privé. L'influence du changement climatique et de l'augmentation du prix des énergies sur le bilan économique sera là aussi étudiée. Enfin, nous évaluerons les coûts marginaux de réduction des consommations d'énergie qui représentent une information précieuse en matière d'investissements de maîtrise de la consommation énergétique.

5.1.2.2. Choix du taux d'actualisation et de la période d'analyse

Le taux d'actualisation et la période d'analyse doivent être définis pour les calculs de CGA (équation (1.2)). La période d'analyse, qui représente la durée durant laquelle les coûts différés sont pris en compte, est fixée à 12 ans, ce qui correspond à la durée de vie d'un appareil de climatisation individuel. Les actions ayant des durées de vie supérieures à cette période d'analyse ne seront pas pénalisées du fait de la prise en compte de la valeur résiduelle dans le calcul du CGA.

Le calcul du CGA requiert l'utilisation d'un taux d'actualisation qui donne un poids différent aux flux financiers suivant la période à laquelle ils sont réalisés. De façon générale, plus le taux d'actualisation est élevé et plus l'on s'éloigne dans le temps, moins les coûts et bénéfices influent sur la valeur du CGA. Comme nous l'avons vu au chapitre 1, ce choix d'escompter l'avenir repose sur deux raisons principales que sont la préférence pure pour le présent (« coût du temps ») et l'aversion au risque (« coût du risque »). Le taux d'actualisation caractérise le degré de préférence du présent sur l'avenir et diffère selon les situations : famille, entreprise, entreprise en manque de liquidités, collectivité...

Cas d'une approche sociétale

En ce qui concerne la collectivité, le taux d'escompte social est supposé traduire l'utilité sociale comme la rentabilité économique des projets. Ainsi, le taux d'actualisation social français, défini par le Commissariat Général au Plan, est passé de 8 % à 4 % en 2005¹²⁷ en raison de l'évolution du contexte économique (baisse des taux d'intérêts réels, marché international des capitaux) mais aussi des préoccupations croissantes en matière d'environnement et des effets à long terme de certaines décisions publiques, qu'un taux d'actualisation élevé a tendance à « écraser » (Lebègue et *al.*, 2005). Cette nouvelle valeur de 4 % déterminée par Lebègue et *al.* (2005) est proche de la moyenne des pays de l'OCDE (5 %) en matière d'investissements nationaux. C'est un taux d'actualisation réel devant être utilisé dans des calculs effectués en monnaie constante (hors inflation). Son utilisation est limitée aux investissements publics, ainsi qu'à ceux contrôlés par la puissance publique¹²⁸.

Par la suite, les coûts seront exprimés en valeur constante (€₂₀₀₈) et ce taux de 4 % sera retenu.

¹²⁷ La dernière détermination du taux d'actualisation (8 %) datait de 1985.

¹²⁸ Tels que les investissements soutenus par le biais de subventions.

Cas d'une approche privée

En ce qui concerne le point de vue privé, les études empiriques révèlent que les résultats observés sur le terrain en matière d'investissement sont éloignés des optimums privés déterminés par les études technico-économiques. Elles tendraient ainsi à montrer que les taux d'actualisation implicites des entreprises ou des ménages sont de l'ordre de 20 % à 35 % avec des pointes pouvant aller jusqu'à 500 ou 800 % (Boulanger, 2007).

Une première explication de ces taux élevés est d'ordre méthodologique car les études théoriques ne tiennent pas toujours compte de façon adéquate des coûts d'inconfort, de transaction et d'information qui peuvent impacter la rentabilité d'une solution. A titre d'exemple, les analyses technico-économiques portant sur l'efficacité de l'éclairage artificiel n'intègrent généralement pas le fait que le confort visuel d'une lampe fluo-compacte est souvent considéré comme moins élevé que celui d'une ampoule à incandescence.

Il reste cependant que les taux d'actualisation pris en compte par les ménages ou les entreprises sont plus élevés que les taux sociétaux du fait de l'aversion au risque, de ressources limitées au moment de l'investissement et des difficultés d'emprunter et d'accéder au capital.

D'autre part, les taux d'actualisation élevés relevés sur le terrain, peuvent se justifier par la rationalité limitée¹²⁹ (et non pas parfaite) des agents économiques privés qui ne recherchent pas la solution optimale mais se contentent d'une solution satisfaisante. Un phénomène qui peut se comprendre par :

- le souhait d'effectuer un choix dans un délai de temps raisonnable,
- les routines, les valeurs et les croyances qui guident la recherche des alternatives et les processus de décision.

Une autre explication réside dans l'existence de dysfonctionnements de marché qui font que le bilan technico-économique privé réel est éloigné des études théoriques. Le manque d'information¹³⁰, les asymétries d'information¹³¹, les intérêts divergents¹³² sont des exemples de dysfonctionnements de marché qui peuvent toutefois être réduits à l'aide de certaines actions publiques (Clinch et Healy, 2000).

Ainsi, si les valeurs élevées des taux d'actualisation observées sont liées en partie aux forts taux d'actualisation des agents économiques privés, elles sont aussi exacerbées par des phénomènes de rationalité limitée et de dysfonctionnement de marché qu'il est possible de corriger à l'aide de certaines actions publiques et que nous n'intégrerons pas dans cette étude.

Par la suite, nous retiendrons un taux d'actualisation de 7 %, une valeur plus élevée que le taux social mais plus faible que celles observés sur le terrain et précédemment mentionnés. Nous supposons également que tous les coûts et avantages sont supportés par une même partie. Il faut garder à l'esprit que, de façon générale, l'optimum privé théorique ne correspond pas à l'optimum privé réel, la Figure 5.4 peut donc être actualisée en Figure 5.5.

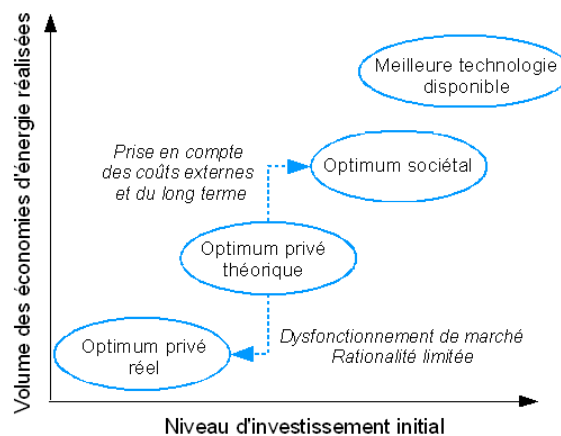


Figure 5.5. Représentation des optimums privés théorique et réel en fonction du volume des économies d'énergie et du niveau d'investissement initial

¹²⁹ Sur la rationalité limitée, on pourra se référer à Selten (2002).

¹³⁰ Coûts de l'information plus élevés sur les moyens d'économiser l'énergie que sur les moyens d'en consommer.

¹³¹ En l'absence d'étiquetage, les vendeurs ou loueurs d'un bâtiment ont une information supérieure à celle du locataire ou de l'acheteur potentiel sur les coûts énergétiques d'utilisation.

¹³² Une partie n'a pas intérêt à supporter le coût d'un investissement car c'est une autre partie qui en touchera les dividendes.

5.1.2.3. Evolution future du prix des énergies sur le marché français

Nous avons vu au chapitre 1 que dans le but d'étudier les solutions d'amélioration du confort d'été, il était nécessaire de tenir compte des interactions entre les différents usages de l'énergie. Aussi devons-nous définir le prix de l'électricité mais aussi des énergies utilisées en chauffage. Selon Axenne et *al.* (2007), les deux principales sources de chauffage en France sont le gaz et l'électricité (environ 33 % du mix pour chacun) et seules ces dernières sont considérées ci-après.

Concernant les coûts des énergies, nous nous reposerons sur l'étude commanditée par le Meeddat concernant les scénarios de forte réduction des émissions de gaz à effet de serre dans les transports et les bâtiments à l'horizon 2050 (Axenne et *al.*, 2007). Les scénarios d'évolution des prix des énergies retenus pour les secteurs résidentiel et tertiaire sont présentés dans le Tableau 5.1. Ces prix hors taxe sont exprimés en monnaie constante (€₂₀₀₈), et supposent une augmentation de 1,5 % par an quelle que soit la source d'énergie. Concernant l'électricité, les valeurs retenues tiennent compte des disparités liées au système tarifaire français (facturation de la puissance souscrite et période de consommation).

Tableau 5.1. Scénario d'évolution des coûts HT des énergies

	Coût HT en 2008 [€cts ₂₀₀₈ /kWh]	Coût HT en 2030 [€cts ₂₀₀₈ /kWh]	Coût HT en 2050 [€cts ₂₀₀₈ /kWh]
Gaz	6,58	9,13	12,30
Electricité	11,40	15,82	21,30

5.1.2.4. Ajustements des prix à effectuer entre les points de vue privé et sociétal

Alors que la réalisation d'une évaluation technico-économique du point de vue privé repose sur les prix du marché, l'adoption du point de vue sociétal nécessite de corriger les prix du marché des interventions de l'Etat (les incitations sont ajoutées, les impôts sont retranchés) qui ne représentent pas une internalisation de coûts liés à la consommation du bien ou du service considéré.

La TVA qui représente la très grande partie des taxes portant sur les équipements (climatiseurs, stores...) ne doit pas être prise en compte dans l'approche sociétale. Dans les chapitres précédents, les prix ont majoritairement été déterminés sans taxe ; nous supposerons par la suite que les prix comprenant les taxes (TTC) sont supérieurs de 20 % aux prix hors taxe (HT). Concernant les climatiseurs, il existe actuellement une écotaxe censée internaliser les coûts de traitement en fin de vie des produits. Elle s'élève à 13 € par produits et a un impact très limité sur le choix des acteurs privés (nous avons par exemple supposé un coût d'installation de 1000 € par appareil).

Selon le Meeddat (2009), le gaz naturel est soumis, en tout et pour tout, au régime de la TVA à 19,6 %. En revanche, l'électricité est soumise aux diverses taxes présentées ci-après qui s'ajoutent à la TVA à 19,6 %.

- Les taxes locales électricité (TLE)

Le produit de ces taxes est reversé aux communes et aux départements dans l'objectif d'améliorer et d'entretenir les réseaux locaux de distribution de l'électricité. Son pourcentage moyen à l'échelle nationale est de 9 % du prix de l'électricité hors taxe.

- La Contribution au Service Public d'Electricité (CSPE)

Cette contribution qui s'élève aujourd'hui à 0,0045 € HT par kWh consommé (soit environ 4 % du prix hors taxe) est destinée à compenser les surcoûts de production dans les zones non connectées au réseau métropolitain (Corse, DOM...), à développer des sources d'énergies renouvelables et de cogénération (électricité et chaleur) et enfin à assurer aux personnes en situation de précarité une tarification spéciale.

- la Contribution Tarifaire d'Acheminement (CTA)

Ce prélèvement additionnel est destiné à assurer le financement des retraites des opérateurs de réseaux.

En raison de diverses taxes qui s'ajoutent à la TVA, la DGEMP (2007) estime que les prix TT sont supérieurs d'environ 32 % aux prix HT, que ce soit pour les usages domestiques ou industriels. Une partie de ces taxes, que nous supposons de 15 % du prix hors taxe du kilowattheure, internalise des coûts liés à la consommation électrique ainsi que des coûts externes (environnement, sécurité énergétique) dans le cas du développement de sources d'énergie alternative. Le coût de l'électricité retenu pour l'analyse sociétale est égal au prix HT majoré de 15 %.

Au final, les coûts des énergies considérés dans la suite de l'étude sont donnés dans le Tableau 5.2.

Tableau 5.2. Coûts des énergies retenus pour l'année 2008

	Coûts considérés dans l'analyse privée (TT) [€cts₂₀₀₈/kWh]	Coût HT [€cts₂₀₀₈/kWh]	Coûts considérés dans l'analyse sociétale [€cts₂₀₀₈/kWh]¹³³
Gaz	6,58	5,40	5,40
Electricité	11,40	8,66	9,96

¹³³ Hors externalité.

5.2 Analyse coût-bénéfice « privée » d'actions d'amélioration du confort d'été

L'objet de cette partie est de procéder à une évaluation coût-bénéfice de différentes solutions permettant de réduire l'inconfort, et ce, en adoptant le point de vue privé. Le CGA sera calculé pour l'ensemble des actions envisageables, ce qui nous permettra de déterminer les mesures optimales du point de vue de l'investisseur tant dans les bâtiments climatisés que dans ceux qui ne le sont pas. Par la suite, nous mènerons une première analyse concernant les économies d'énergie pouvant être réalisées à partir des solutions optimales du point de vue privé. Enfin, un premier exercice de prospective consistera à étudier l'influence du changement climatique et de l'augmentation du prix des énergies sur le bilan économique des agents privés et donc sur les tendances à venir, notamment en ce qui concerne le développement de la climatisation individuelle.

5.2.1 Description de la situation de référence

5.2.1.1. Situation de référence et actions étudiées

La définition de situations de référence est nécessaire pour amorcer une analyse coût-bénéfice, les coûts et avantages étant mesurés à partir de celle-ci. L'objectif de l'agent économique privé étant de réduire l'inconfort d'une pièce, nous avons décidé d'exprimer les résultats (différence de CGA) en fonction d'une situation de référence correspondant aux pièces non climatisées définies au chapitre 3.

Les solutions portant sur l'usage et l'enveloppe du bâtiment ont été caractérisées techniquement et économiquement au chapitre 3 et nous reprenons ici ces résultats. En ce qui concerne le coût des climatiseurs sur leur durée de vie, nous nous reposerons sur les hypothèses économiques définies au chapitre 4 pour les appareils réversibles¹³⁴. Leur prix d'achat a notamment été déterminé en fonction de l'efficacité saisonnière qui peut varier de 3 à 7,1 en refroidissement. Nous supposons par la suite que les climatiseurs ne sont pas utilisés en mode chauffage et, comme nous l'avons expliqué dès le chapitre 1, la consommation électrique s'obtient alors en divisant les besoins de refroidissement des pièces étudiées par l'efficacité saisonnière. L'hypothèse de dimensionnement nécessaire au calcul du prix des appareils est supposée être celle présentée au chapitre 4 (partie 4.1.2.8). Enfin, les résultats présentés dans la suite de l'étude reposent sur l'hypothèse que les besoins de chauffage sont couverts par un système de chauffage fonctionnant au gaz et d'efficacité saisonnière égale à 80 %¹³⁵.

Des descriptions succinctes des actions étudiées dans le présent chapitre sont présentées dans les Tableau 3.23 (appartement), Tableau 5.4 (bureaux) et Tableau 3.19 (boutiques).

Tableau 5.3. Actions étudiées pour la pièce d'appartement

Actions	Acronyme	Description des actions
Mise en place de protections solaires	PS	Facteur solaire de 0,1 – Baissées en inoccupation l'été
Installation de vitrages à faible facteur solaire	V	Facteur solaire de 0,298 – Transmission visible 0,383 U=1,3 W/m²/K
Ventilation naturelle nocturne	VN	Ouverture de 10 % de la surface vitrée à partir de 23 h lorsque cela permet un rafraîchissement et uniquement lorsque la pièce n'est pas climatisée.
Installation d'un climatiseur d'efficacité saisonnière i	AC(i)	L'efficacité saisonnière peut varier de 3 (appareil moyen sur le marché actuel) à 7,1 en refroidissement

¹³⁴ Les différences de coûts entre réversible et non réversible sont très faibles et ne justifient pas de traiter deux cas dans ce chapitre.

¹³⁵ Valeur représentative du stock des systèmes fonctionnant au gaz en 2005 selon Iles et al. (2002).

Tableau 5.4. Actions étudiées pour les pièces de bureaux

Actions	Acronyme	Description des actions
Mise en place de protections solaires	PS	Facteur solaire de 0,3 – Contrôle en fonction du rayonnement présenté au chapitre 3
Remplacement du système d'éclairage	E	Puissance installée de 10 W/m ²
Installation de vitrages à faible facteur solaire	V	Facteur solaire de 0,298 – Transmission visible 0,383 U=1,3 W/m ² /K
Ventilation naturelle nocturne	VN (N)	Ouverture de 30 % de la surface vitrée - Algorithme de contrôle présenté au chapitre 3
Ventilation naturelle diurne/nocturne	VN (D/N)	Ouverture de 30 % de la surface vitrée - Algorithme de contrôle présenté au chapitre 3
Ventilation mécanique nocturne	VM	Débit de 6 ACH – Algorithme de contrôle présenté au chapitre 3
Installation d'un climatiseur d'efficacité saisonnière i	AC(i)	L'efficacité saisonnière peut varier de 3 (appareil moyen sur le marché actuel) à 7,1 en refroidissement

Tableau 5.5. Actions étudiées pour les boutiques

Actions	Acronyme	Description des actions
Mise en place d'une banne	PS	Facteur solaire de 0,3 – Contrôle en fonction du rayonnement présenté au chapitre 3
Remplacement du système d'éclairage	E	Puissance installée de 12 W/m ²
Installation de vitrages à faible facteur solaire	V	Facteur solaire de 0,298 – Transmission visible 0,383 U=1,3 W/m ² /K
Ventilation mécanique nocturne	VM	Débit de 6 ACH – Contrôle présenté au chapitre 3
Installation d'un climatiseur d'efficacité saisonnière i	AC(i)	L'efficacité saisonnière peut varier de 3 (appareil moyen sur le marché actuel) à 7,1 en refroidissement

Dans cette étude, nous calculerons la différence de CGA entre la situation de référence et chacune des combinaisons d'actions envisageables. La monétisation de l'inconfort établie au chapitre 2 permet de comparer les situations intégrant un climatiseur aux situations ne garantissant pas un confort total.

5.2.1.2. Anticipation, remplacement programmé et nouvel équipement

Une distinction doit être effectuée entre les actions de réduction des consommations d'énergie selon qu'elles consistent en des remplacements anticipés (qui ne sont pas liés à l'obsolescence d'équipements), des remplacements programmés (lorsque un équipement, un composant devait être de toute façon remplacé) ou des installations de nouveaux équipements.

Suivant la configuration, la situation de référence change, impactant l'estimation des surcoûts et des économies d'énergie. A titre d'illustration, le Tableau 5.6 présente le surcoût d'investissement (actualisé en 2008) engendré par le remplacement des vitrages selon que le remplacement est programmé ou anticipé de 10 ans. Selon l'hypothèse choisie, le surcoût d'investissement de cette action varie du simple au double.

Tableau 5.6. Surcoût d'investissement engendré par le remplacement des vitrages selon différentes hypothèses de remplacement (taux d'actualisation de 7 %)

	Coût actualisés en 2008	
	Cas d'un remplacement programmé	Cas d'un remplacement anticipé de 10 ans
Coût de la vitre de référence [€ / m ² de vitrage]	350	190
Coût de la vitre à faible facteur solaire [€ / m ² de vitrage]	520	520
Surcoût [€ par m ² de vitrage]	170	330

Pour la suite de l'étude, les protections solaires, les systèmes de ventilation et les climatiseurs sont considérés comme de nouveaux équipements dont les pièces de référence ne sont pas munies.

Les deux actions restantes (remplacement des vitrages et du système d'éclairage) sont supposées correspondre à des remplacements anticipés de 15 ans (vitrage) et 10 ans (éclairage), ce qui correspond à la moitié de leur durée de vie. Une étude de sensibilité sera cependant effectuée afin d'évaluer dans quelle mesure une hypothèse de remplacement programmé impacte les résultats. Nous supposons alors que ces composants auraient été remplacés à l'identique.

5.2.2 Résultats de l'analyse coût-bénéfice « privé » des actions d'amélioration du confort estival

Dans cette partie, nous comparons le CGA des différentes combinaisons d'actions envisageables en intégrant tous les coûts privés généralisés dont les coûts d'inconfort.

5.2.2.1. Le cas des pièces de bureaux

Pièce de référence située à Trappes

La Figure 5.6 présente, dans le cas de la pièce de bureau à Trappes, le placement des différentes actions étudiées en fonction des bénéfices (exprimés par unité de surface) pouvant être réalisés par rapport à la situation de référence, et des degrés-heures d'inconfort.

Le point situé sur l'axe des ordonnées correspond à la configuration permettant un confort total au moindre coût. Les autres points se rapportent aux actions d'enveloppe et d'usage du bâtiment mises en place sans climatisation.

Lorsque les coûts d'une action ou ensemble d'actions sont supérieurs aux bénéfices, alors les bénéfices sont notés négativement sur cette figure. Dans le cas présenté ici, il s'agit des actions associant le remplacement des vitrages à l'installation des protections solaires, sans mettre en place de climatisation. Pour les autres configurations, l'amélioration importante du confort, traduite en termes monétaires, permet souvent de rentabiliser les dépenses. De plus, dans le cas du remplacement du système d'éclairage, les économies d'électricité réalisées sont supérieures au surinvestissement initial.

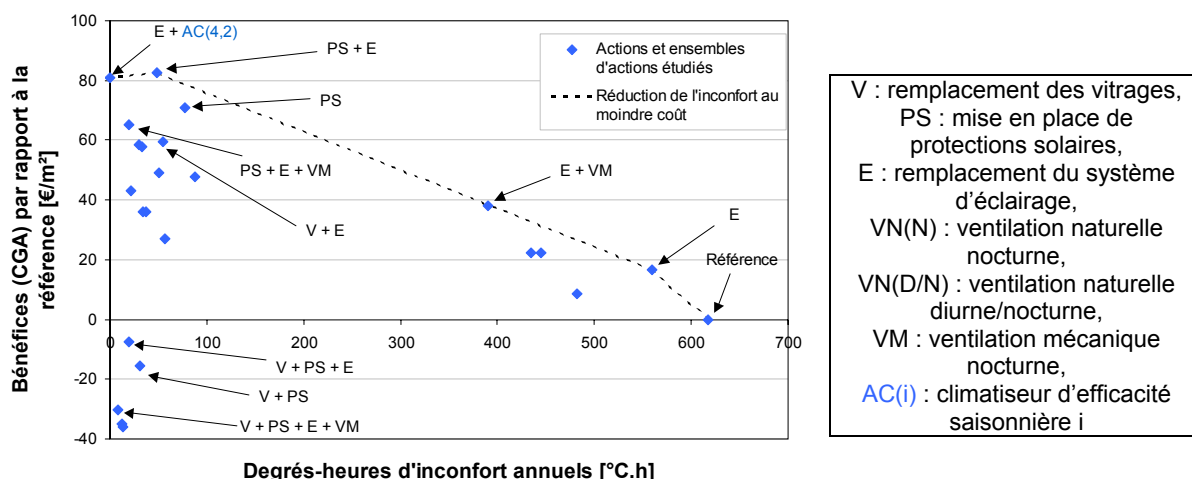


Figure 5.6. Bénéfices (notés positivement) engendrés par les différentes actions étudiées en fonction de l'inconfort annuel pour la pièce de bureau située à Trappes

Du point de vue privé, la configuration la plus avantageuse consiste à mettre en place des protections solaires et à réduire les apports internes liés à l'éclairage sans recourir à la climatisation. Avec nos hypothèses économiques, il apparaît que cette action engendre des bénéfices un peu supérieurs (2 €/m²) à ceux de la solution optimale comprenant un climatiseur.

A partir du moment où l'on recherche un confort total, la meilleure disposition combine l'installation d'un appareil d'efficacité saisonnière égale à 4,2 associé au remplacement du système d'éclairage. Cet optimum justifie donc l'investissement dans un climatiseur plus efficace que la moyenne du marché actuel (efficacité saisonnière de 3). La mise en place d'actions d'amélioration supplémentaires portant sur l'enveloppe du bâtiment coûterait plus qu'elle ne pourrait rapporter. Ainsi, l'installation d'une protection solaire ou le remplacement des vitrages représenteraient des surcoûts en CGA respectivement égaux à 35 €/m² et 50 €/m².

Pièce de référence située à Nice

La Figure 5.7 présente les résultats obtenus pour la pièce de bureaux située à Nice. En raison d'une réduction de l'inconfort beaucoup plus importante qu'à Trappes, toutes les actions sont ici bénéfiques par rapport à la référence.

La configuration sans climatisation la plus avantageuse consiste à s'équiper de protections solaires, à remplacer le système d'éclairage et à installer un appareil de ventilation mécanique nocturne. L'obtention du confort total au moindre coût engendre cependant des bénéfices plus importants (10 €/m²). Il combine un investissement dans un climatiseur plus efficace que la moyenne du marché (efficacité saisonnière de 3) et le remplacement du système d'éclairage. Les autres mesures de réduction des besoins ne sont alors plus avantageuse pour l'utilisateur, l'installation d'une protection solaire ou le remplacement des vitrages représente en effet des surcoûts en CGA respectivement égaux à 30 €/m² et 45 €/m².

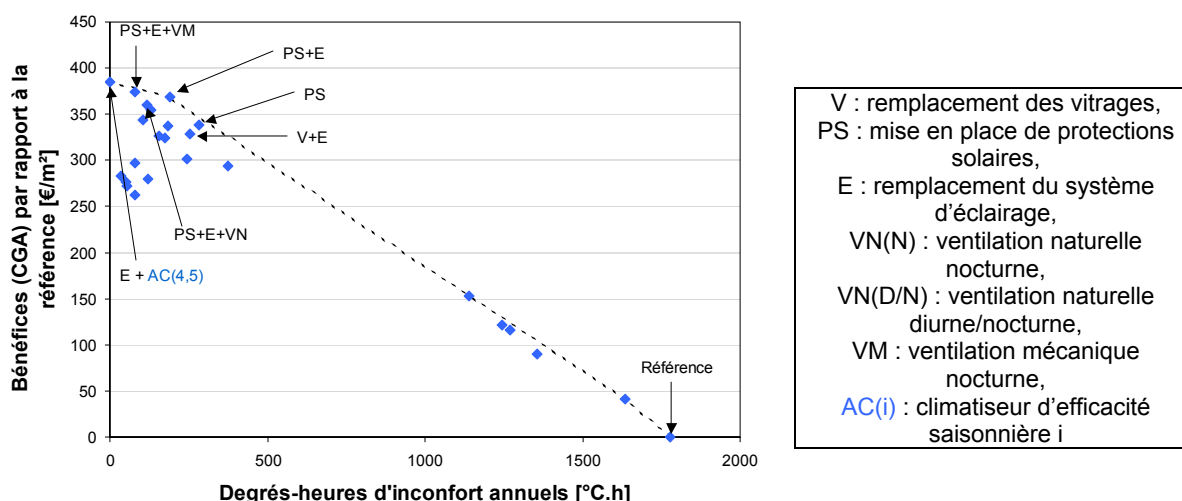


Figure 5.7. Bénéfices engendrés par les différentes actions étudiées en fonction de l'inconfort annuel pour la pièce de bureau située à Nice

Remplacements programmés et anticipés

Les résultats précédents reposent sur l'hypothèse que le remplacement de l'éclairage et des vitrages sont des remplacements anticipés. L'action consistant à remplacer le système d'éclairage présente le meilleur ratio coût-bénéfice lorsqu'elle est mise en place individuellement et son bilan se verrait encore amélioré en supposant un remplacement programmé. D'ailleurs, comme nous l'avons vu, le remplacement du système d'éclairage est intégré dans toutes les combinaisons d'actions optimales du point de vue privé, que ce soit dans les pièces climatisées ou non climatisées.

La Figure 5.8 reprend les résultats présentés pour la pièce de bureaux à Trappes dans le cas d'un remplacement programmé des vitrages. Cette action est alors justifiée économiquement, à la fois dans les pièces non climatisées et dans les pièces climatisées. La meilleure configuration consiste à remplacer les vitrages et à réduire les apports internes liés à l'éclairage sans recourir à la climatisation, ce qui engendre des bénéfices plus importants (30 €/m²) que ceux de la meilleure solution comprenant un climatiseur.

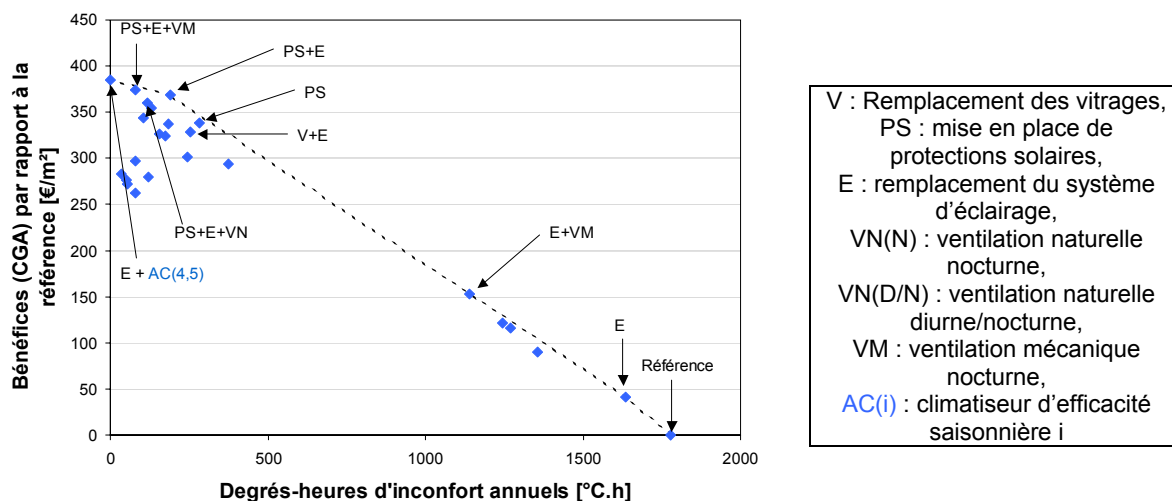


Figure 5.8. Bénéfices engendrés par les différentes actions étudiées en fonction de l'inconfort annuel pour la pièce de bureau à Trappes en supposant que le vitrage est un remplacement programmé

Pièces rénovées

La Figure 5.9 présente, dans le cas de la pièce de bureau rénovée à Trappes, le positionnement des différentes actions étudiées en fonction des bénéfices (exprimés par unité de surface) pouvant être réalisés par rapport à la situation de référence, et des degrés-heures d'inconfort.

Ces résultats sont similaires à ceux obtenus pour la pièce non rénovée. La configuration optimale reste la même (installation des protections solaires et remplacement de l'éclairage) mais ses bénéfices par rapport aux meilleures solutions intégrant un climatiseur se trouvent réduits et sont maintenant quasiment nuls. Les besoins de refroidissement étant plus importants dans les pièces rénovées, un investissement supplémentaire est justifié sur l'équipement (efficacité saisonnière de 4,5 dans le cas de Trappes) mais pas sur l'enveloppe.

De la même manière, le fait de considérer la pièce rénovée à Nice ne modifie pas l'ordre des meilleures actions par rapport à la pièce non rénovée. L'augmentation des besoins de refroidissement n'est cependant pas suffisante pour justifier un investissement supplémentaire (par rapport à la pièce non rénovée) ni sur l'équipement ni sur l'enveloppe.

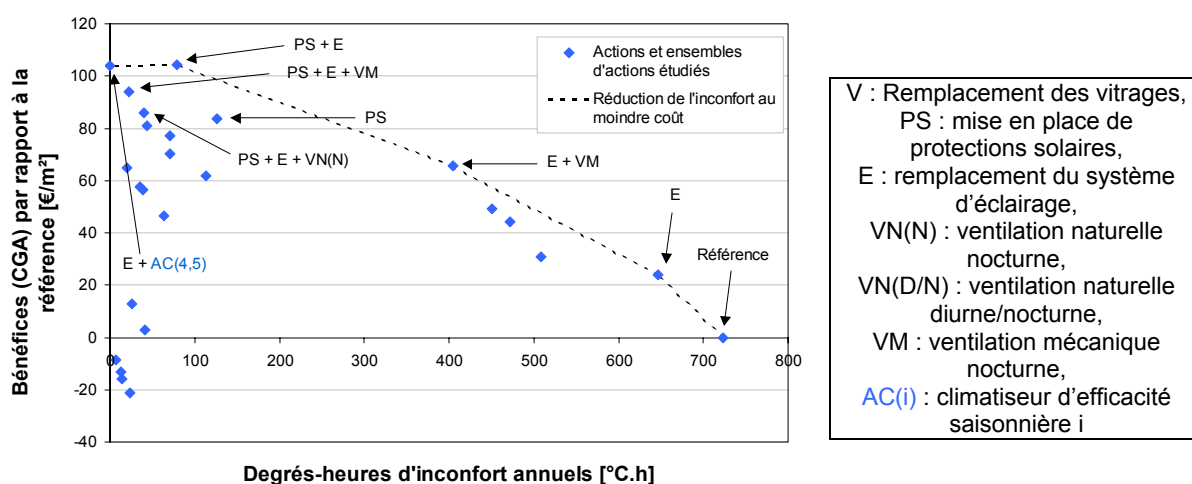


Figure 5.9. Bénéfices engendrés par les différentes actions étudiées en fonction de l'inconfort annuel pour la pièce de bureau rénovée à Trappes

Influence des coûts d'inconfort thermique

Nous avons vu qu'avec nos hypothèses de référence, l'optimum économique correspondait à une situation sans climatisation à Trappes (à condition que l'ouverture des fenêtres soit possible) et à une configuration avec climatisation à Nice. Ces résultats dépendent bien évidemment de la méthode de monétisation de l'inconfort que nous avons retenue au chapitre 2. Nous cherchons ici à évaluer dans quelle mesure la valeur des coûts d'inconfort thermique impacte la justification économique de la climatisation.

La Figure 5.10 présente les coûts marginaux de réduction de l'inconfort dans les différentes pièces de bureaux étudiées. La partie 5.1.1.3 a exposé les méthodes de construction et de lecture de ce type de courbe, qui représente les moyens de réduction de l'inconfort les plus efficaces en fonction des degrés-heures d'inconfort évités. Le recours à la climatisation permet une réduction totale de l'inconfort et forme donc le dernier palier des différentes courbes.

Si le remplacement de l'éclairage est justifié économiquement (car son CGA est négatif), la justification des autres actions pour l'investisseur dépend de la monétisation de l'inconfort sur laquelle il se repose. Avec nos hypothèses de référence (densité d'occupation et monétisation), le coût de l'inconfort est estimé à environ 2,3 €/m²/°C.h et la climatisation est alors justifiée économiquement pour Nice mais ne l'est pas pour Trappes. Cette dernière conclusion est cependant peu robuste pour Trappes puisqu'une faible augmentation du coût de l'inconfort (10 % soit 2,5 €/m²/°C.h) modifie la comparaison économique entre climatisé et non climatisé (Figure 5.10). A contrario, le fait que la climatisation est économiquement avantageuse à Nice est un résultat robuste qui se vérifie même lorsque les coûts d'inconfort sont réduits de 40 %.

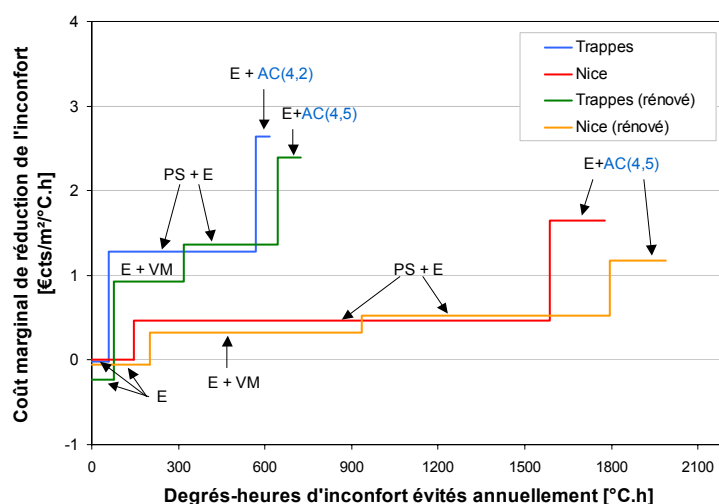


Figure 5.10. Coût marginal de réduction de l'inconfort dans les pièces de référence (E : remplacement du système d'éclairage, PS : mise en place de protections solaires, VM : installation d'un système de ventilation nocturne, AC(i) : climatiseur d'efficacité saisonnière i)

Influence des coûts d'inconfort sonore

Afin d'estimer dans quelle mesure la prise en compte des coûts d'inconfort sonore peut influencer le bilan économique des agents privés, nous avons supposé que les pièces climatisées, dont les fenêtres restent toujours fermées, permettaient de garantir des niveaux de confort acoustique satisfaisants et sans coût externe. Au contraire, l'utilisation des fenêtres expose les occupants à des nuisances sonores évaluées à 52 €/personne/an dans le cas d'une rue résidentielle (60 dB(A))¹³⁶.

Comme on peut s'y attendre, la prise en compte des nuisances sonores peut fortement influencer le bilan économique et modifier les résultats de la comparaison entre pièces climatisées et pièces non climatisées. Ainsi, la configuration optimale à Trappes (installation de protections solaires et remplacement du système d'éclairage, voir Figure 5.6) qui représentait un gain de 2 €/m² par rapport à

¹³⁶ Voir chapitre 2.

la meilleure solution climatisée (voir Figure 5.6) est maintenant à l'origine d'un surcoût de 20 €/m². La simple installation de l'appareil de climatisation représentatif du marché actuel (efficacité saisonnière égale à 3) devient même plus avantageuse que cette configuration initialement optimale.

Cette évaluation rudimentaire montre que l'inconfort sonore peut justifier économiquement le recours à la climatisation, et ce, même dans des configurations où l'inconfort thermique est limité.

Récapitulatif

La Tableau 5.7 présente les configurations optimales du point de vue privé selon que le remplacement des vitrages est programmé ou anticipé. Les meilleures solutions sans climatisation consistent à réduire les apports internes et solaires à Trappes, à y associer un système de ventilation mécanique nocturne à Nice. Cette protection des apports solaires s'effectue à l'aide de protections solaires, excepté en cas de remplacement programmé des vitrages, les vitres à faible facteur solaire devenant alors plus efficaces économiquement.

Lorsque l'on installe un climatiseur, les solutions optimales correspondent à l'installation d'un climatiseur plus efficace que la moyenne du marché actuel (efficacité saisonnière de 3), aussi qu'au remplacement du système d'éclairage. Dans le cas d'un remplacement programmé des vitrages, la mise en place de vitrages à faible facteur solaire fait elle-aussi partie de la combinaison optimale.

Tableau 5.7. Optimums privés pour les pièces de bureaux

	Sans climatisation		Avec climatisation	
	Remplacement anticipé des vitrages	Remplacement programmé des vitrages	Remplacement anticipé des vitrages	Remplacement programmé des vitrages
Trappes	PS + E	V+E	E + AC(4,2)	E + V + AC(4,2)
Trappes – rénové	PS + E	V + E	E + AC(4,5)	E + V + AC(4,5)
Nice	PS + E + VM	V+ E + VM	E + AC(4,5)	E + V + AC(4,5)
Nice – rénové	PS + E + VM	V + E + VM	E + AC(4,5)	E + V + AC(4,5)
E : remplacement du système d'éclairage, PS : mise en place de protections solaires, V : remplacement des vitrages, VM : installation d'un système de ventilation mécanique nocturne, AC(i) : climatiseur d'efficacité saisonnière i.				

La comparaison entre solutions climatisées et non climatisées tourne à l'avantage de la première configuration lorsque le coût d'inconfort dépasse 1,5 €/m²/°C.h à Nice et 2,5 €/m²/°C.h à Trappes. Avec nos hypothèses, les bénéfices d'une climatisation sont supérieurs à ceux d'une pièce non climatisée à Nice et du même ordre à Trappes. Attention cependant, les coûts d'inconfort sonore peuvent justifier pleinement le recours à la climatisation.

5.2.2.2. Le cas des boutiques

La Figure 5.11 présente, dans le cas de la boutique à Trappes, le positionnement des différentes actions étudiées en fonction des bénéfices (exprimés par unité de surface) pouvant être réalisés par rapport à la situation de référence, et des degrés-heures d'inconfort.

Le point situé sur l'axe des ordonnées correspond à la configuration permettant un confort total au moindre coût, les autres points se rapportent aux actions d'enveloppe et d'usage du bâtiment mises en place sans climatisation.

En raison de l'inconfort important régnant dans la pièce de référence, toutes les combinaisons d'actions sont bénéfiques du point de vue privé. Cependant, la meilleure configuration non climatisée représente un surcoût colossal, de l'ordre de 250 €/m², par rapport à la configuration optimale qui intègre le recours à la climatisation. L'importance des coûts d'inconfort calculés pour les pièces non climatisées est principalement liée à l'adaptation quasiment impossible des occupants¹³⁷ et à une densité d'occupation élevée. A titre d'illustration, il faudrait réduire d'un facteur 6 ces coûts d'inconfort pour que les configurations sans climatisation aient des bénéfices similaires à celles

¹³⁷ Nous avons expliqué au chapitre 3 que, dans ce cas, la zone de confort n'était plus adaptative mais analytique.

intégrant un climatiseur. Ce constat est évidemment amplifié pour le climat de Nice et dans les boutiques rénovées.

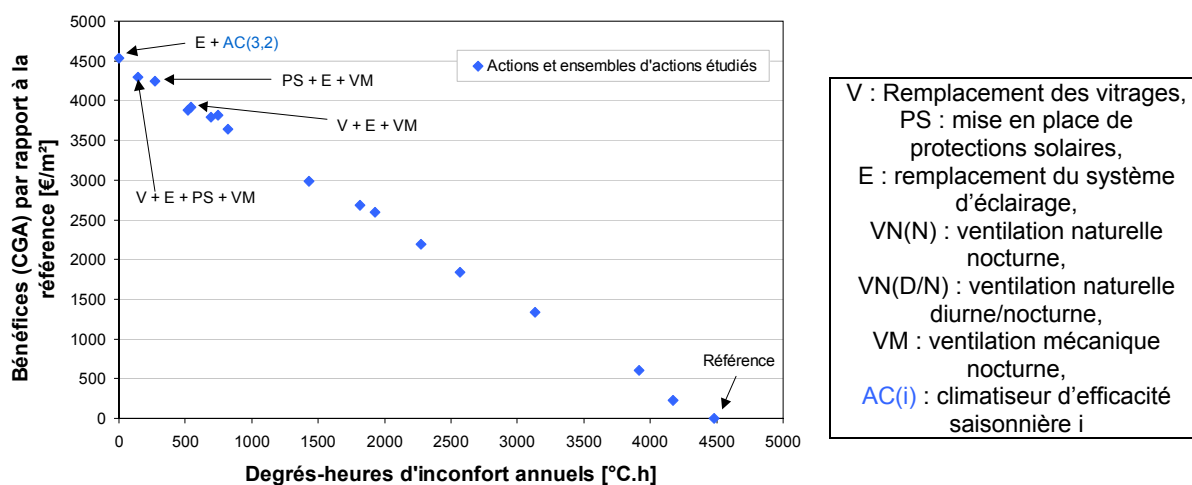


Figure 5.11. Bénéfices engendrés par les différentes actions étudiées en fonction de l'inconfort annuel pour la boutique située à Trappes

Nous nous concentrons maintenant sur les pièces climatisées. Le Tableau 5.8 présente les optimums privés ainsi que les surcoûts engendrés par la mise en place d'actions supplémentaires portant sur l'enveloppe du bâtiment. A l'instar des bureaux, le remplacement du système d'éclairage est à réaliser dans toutes les pièces étudiées et les configurations optimales comprennent l'installation d'un climatiseur plus efficace que la moyenne du marché actuel (efficacité saisonnière de 3). Les protections solaires sont justifiées à Nice mais ne le sont pas à Trappes où elles représentent un surcoût de l'ordre de 5 €/m² par rapport à la solution optimale.

Tableau 5.8. Optimums privés et surcoûts (CGA) des actions d'enveloppe

	Optimums privés	Surcoût store	Surcoût vitrage	Surcoût ventilation mécanique
Trappes	E + AC(3,2)	5 €/m ²	68 €/m ²	34 €/m ²
Trappes – rénové	E + AC(4,2)	6 €/m ²	88 €/m ²	35 €/m ²
Nice	E + PS + AC(4,5)	-	92 €/m ²	38 €/m ²
Nice – rénové	E + PS + AC(4,5)	-	100 €/m ²	37 €/m ²

Dans le cas d'un remplacement programmé des vitrages (Tableau 5.9), l'installation de vitrages à faible facteur solaire fait partie de la configuration optimale pour les 4 pièces considérées et les protections solaires ne sont alors plus justifiées économiquement. L'efficacité saisonnière des climatiseurs compris dans les combinaisons optimales ne se trouve pas modifiée.

Tableau 5.9. Optimums privés et surcoûts (CGA) des actions d'enveloppe

	Optimums privés	Surcoût store	Surcoût ventilation mécanique
Trappes	E + V + AC(3,2)	21 €/m ²	35 €/m ²
Trappes – rénové	E + V + AC(4,2)	21 €/m ²	36 €/m ²
Nice	E + V + AC(4,5)	18 €/m ²	35 €/m ²
Nice – rénové	E + V + AC(4,5)	17 €/m ²	36 €/m ²

5.2.2.3. Le cas des pièces résidentielles

Les actions d'amélioration du confort d'été étudiées dans le cas de l'appartement ont été décrites au chapitre 3 et rappelées en préambule de cette partie (Tableau 3.23). A ce stade, nous devons cependant effectuer une distinction entre l'installation de protections solaires dont le coût d'investissement est non nul, et l'utilisation de volets qui sont souvent déjà disponibles dans le secteur résidentiel. Tout comme la ventilation naturelle nocturne, la gestion des volets est une action comportementale qui peut être efficace pour lutter contre l'inconfort estival, et ce, pour un coût d'investissement nul.

La Figure 5.12 présente, dans le cas de la pièce d'appartement à Trappes, le positionnement des différentes actions étudiées en fonction des bénéfices (exprimés par unité de surface) pouvant être réalisés par rapport à la situation de référence, et des degrés-heures d'inconfort.

Les points situés sur l'axe des ordonnées correspondent aux configurations permettant un confort total au moindre coût avec et sans action comportementale. Les autres points se rapportent aux actions d'enveloppe et d'usage du bâtiment mises en place sans climatisation. Les actions notées en rouge sont de nature comportementale.

A Trappes (Figure 5.12), les solutions les plus avantageuses sont les actions comportementales qui permettent de réduire l'inconfort pour un coût d'investissement nul. Ainsi, une gestion efficace des volets et le recours à la ventilation naturelle représentent un bénéfice de respectivement 50 €/m² et 35 €/m² par rapport à la solution associant climatiseur et utilisation des volets. Le recours simultané à ces deux actions comportementales entraîne un bénéfice de 60 €/m². Si aucune de ces deux actions n'est possible, alors la Figure 5.12 montre que la meilleure configuration climatisée correspond à l'installation d'un appareil d'efficacité saisonnière égale à 3 (appareil moyen sur le marché) mais que celle-ci est moins avantageuse que la simple mise en place de protections solaires (surcoût de 20 €/m²).

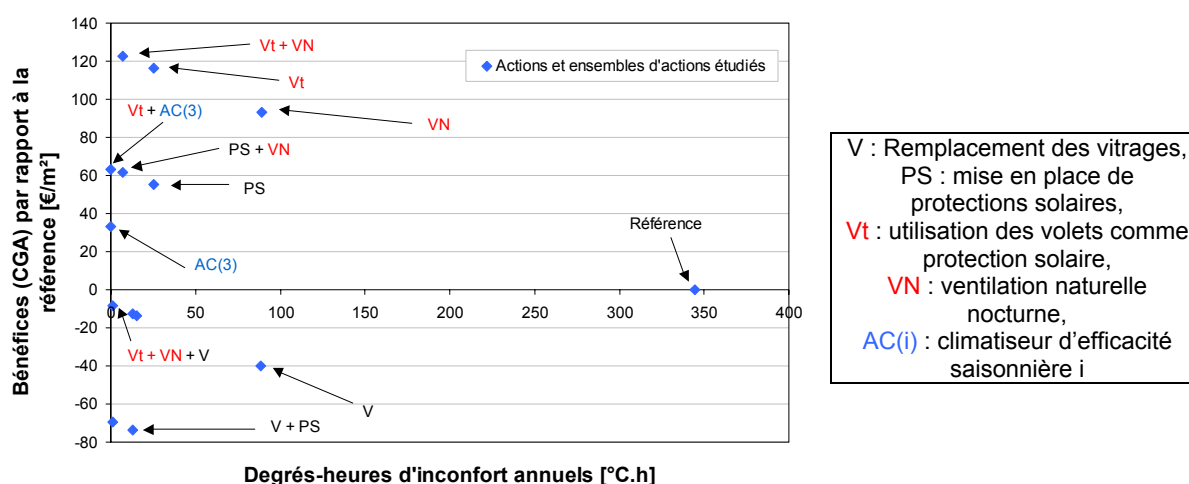


Figure 5.12. Bénéfices (notés positivement) engendrés par les différentes actions étudiées en fonction de l'inconfort annuel pour la pièce résidentielle située à Trappes

La Figure 5.12 révèle que les combinaisons d'actions intégrant le remplacement des vitrages ne sont pas bénéficiaires malgré des gains obtenus à la fois dans la réduction des consommations de chauffage et dans l'amélioration du confort. Dans le cas d'un remplacement programmé (Figure 5.13), ces combinaisons d'actions deviennent bénéficiaires mais ne sont toujours pas justifiées du point de vue privé. En effet, si l'usage des volets ou le recours à la ventilation naturelle est possible, les meilleures solutions consistent à utiliser ces actions sans remplacer les vitrages ; si ces actions comportementales ne sont pas envisageables, alors la protection solaire est plus avantageuse que le remplacement des vitrages. Si, dans le but de réduire l'inconfort estival et les besoins de refroidissement, le renouvellement des vitrages n'est pas à favoriser, il le serait cependant dans le cas d'un objectif de diminution des consommations de chauffage (mais avec un facteur solaire moins élevé).

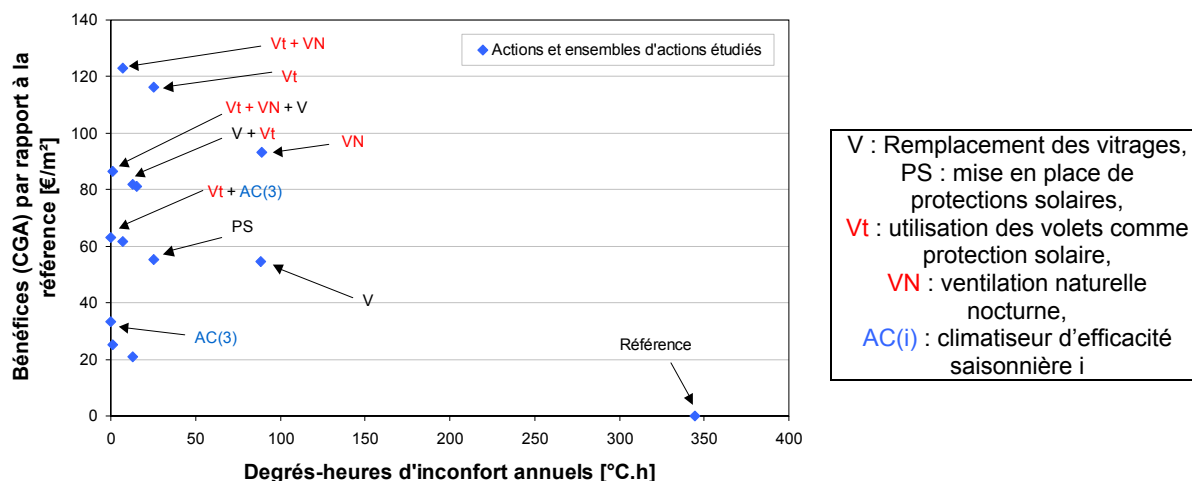


Figure 5.13. Bénéfices engendrés par les différentes actions étudiées en fonction de l'inconfort annuel la pièce résidentielle située à Trappes dans le cas d'un remplacement programmé des vitrages

Comme l'indique la Figure 5.14, les résultats obtenus pour le climat de Nice sont similaires. Les meilleures solutions sont les actions comportementales puisque une gestion efficace des volets représente un bénéfice de 50 €/m² environ par rapport à la solution de climatisation avec volets et 60 €/m² si elle est associée à une stratégie de ventilation naturelle nocturne. Si aucune de ces deux actions n'est envisageable, alors la Figure 5.14 montre que la meilleure action climatisée correspond à l'installation d'un appareil d'efficacité saisonnière égale à 3 (appareil moyen sur le marché) mais que celle-ci est moins avantageuse que la simple mise en place de protections solaires (surcoût de 25 €/m²). D'autre part, le remplacement des vitrages ne fait pas partie des actions à favoriser dans le but d'améliorer le confort d'été, même en cas de remplacement programmé.

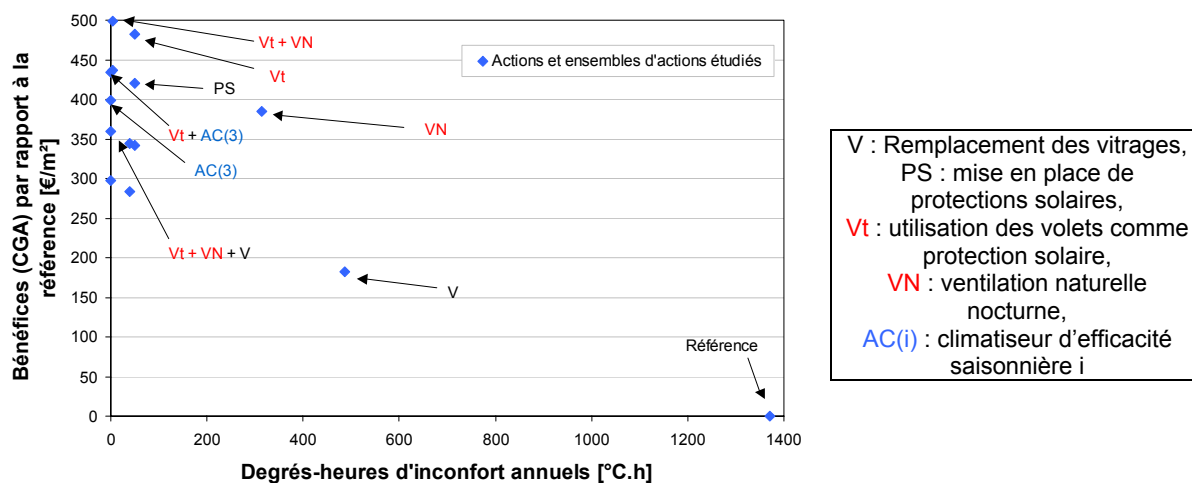


Figure 5.14. Bénéfices engendrés par les différentes actions étudiées en fonction de l'inconfort annuel la pièce résidentielle située à Nice

Lorsqu'il n'y a ni protections solaires existantes, ni possibilité de recourir à la ventilation naturelle, la comparaison entre solutions climatisées et non climatisées tourne à l'avantage de la première configuration car nos coûts d'inconfort sont augmentés de 300 % à Trappes et de 130 % à Nice. Le résultat selon lequel les bénéfices d'une climatisation ne justifient pas son installation apparaît donc assez robuste. Cependant, si l'on prend en compte les coûts d'inconfort sonore de la même manière

que pour les pièces de bureaux (partie 5.2.2.1), alors l'usage de la climatisation devient pleinement justifié dans le cas d'une rue où la circulation est importante¹³⁸.

Récapitulatif

Le Tableau 5.10 présente les configurations optimales du point de vue privé pour les pièces étudiées. Avec nos hypothèses de coût, les bénéfices d'une climatisation ne justifient pas son installation (si l'ouverture des fenêtres est possible et sans prise en compte des nuisances sonores). Les actions comportementales sont généralement celles engendrant les bénéfices les plus importants et lorsque ce n'est pas le cas, il reste toujours préférable d'investir dans des protections solaires.

Tableau 5.10. Optimums privés pour les pièces résidentielles en fonction des actions comportementales envisageables

	Actions comportementales possibles			Actions comportementales impossibles
	Volets	Ventilation nocturne	Volets et ventilation nocturne	
Trappes	Vt	VN	Vt + VN	PS
Trappes – rénové	Vt	VN	Vt + VN	PS
Nice	Vt	PS + VN	Vt + VN	PS
Nice – rénové	Vt	PS + VN	Vt + VN	PS
PS : mise en place de protections solaires, Vt : utilisation des volets comme protection solaire, VN : ventilation naturelle nocturne				

Lorsque l'on installe un climatiseur, les solutions optimales (Tableau 5.11) correspondent à l'installation d'un climatiseur dont l'efficacité est dans la moyenne du marché actuel (efficacité saisonnière de 3) sans amélioration de l'enveloppe de la pièce.

Tableau 5.11. Optimums privés pour les pièces résidentielles climatisées

	Volets disponibles	Pas de volet disponible
Trappes	Vt + AC(3)	AC(3)
Trappes – rénové	Vt + AC(3)	AC(3)
Nice	Vt + AC(3)	AC(3)
Nice – rénové	Vt + AC(3)	AC(3)
Vt : utilisation des volets comme protection solaire, AC(i) : climatiseur d'efficacité saisonnière i		

5.2.2.4. Se rapprocher des optimums privés : un premier gisement d'économies d'énergie

De façon générale, l'ACB privée aboutit à la justification de l'installation de la climatisation dans les boutiques et dans les pièces de bureaux à Nice, et à sa désapprobation dans les appartements lorsque l'ouverture des fenêtres est possible. Dans le cas des pièces de bureaux à Trappes, les bénéfices entre configurations climatisées et non climatisées sont du même ordre.

Ces résultats sont en accord avec les observations de ventes actuelles montrant une pénétration importante de la climatisation individuelle dans les bureaux et les boutiques, et marginale dans le secteur résidentiel¹³⁹.

Dans un premier temps, il est envisageable de réduire les consommations de climatisation, tout en restant en accord avec l'optimum privé, en évitant l'installation de climatiseurs dans le secteur résidentiel lorsque c'est possible (nuisances sonores limitées ...).

En ce qui concerne les pièces climatisées, la réalisation des solutions optimales du point de vue privé représente là aussi un potentiel important de réduction des consommations d'énergie. La Figure 5.15

¹³⁸ La monétisation retenue au chapitre 2 était de 156 €/personne/an.

¹³⁹ Voir les taux de pénétration établis dans la partie 5.4.1.3 (Tableau 5.37).

présente une comparaison des consommations unitaires de référence et des consommations correspondant aux optimums économiques privés. La situation de référence consiste en l'installation d'un climatiseur d'efficacité saisonnière égale à 3 (valeur moyenne sur le marché actuel d'après les résultats du chapitre 4). Dans le cas des bureaux, adopter la configuration optimale permet de réduire la consommation de climatisation de l'ordre de 40 % (remplacement anticipé des vitrages) à 70 % (remplacement programmé des vitrages). Ce potentiel d'économies varie de 30 % (remplacement anticipé des vitrages) à 80 % (remplacement programmé des vitrages) dans le cas des boutiques.

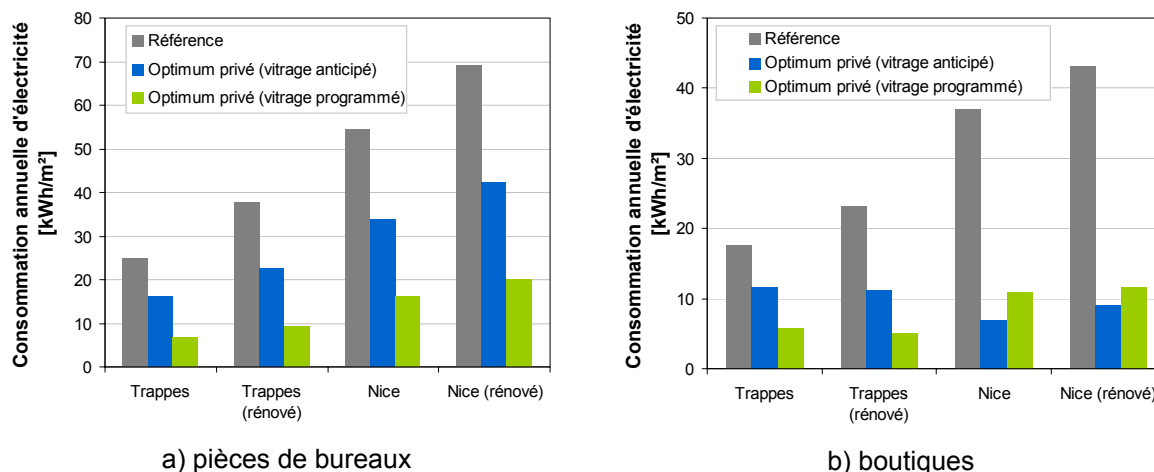


Figure 5.15. Comparaison des consommations unitaires de référence et des consommations correspondant aux optimums économiques privés

La Figure 5.16 présente les potentiels de réduction des consommations électriques de climatisation dans le cas des pièces d'appartement. Une distinction est faite entre la situation où des protections solaires extérieures sont déjà présentes (volets) et celle où ce n'est pas le cas.

Dans la première configuration, le comportement des occupants peut permettre une très forte réduction des consommations unitaires (75 % - 90 %). A contrario, nous avons vu que sans la présence de protections solaires, aucun investissement supplémentaire n'était justifié, ni sur l'appareil, ni sur l'enveloppe, et qu'aucune économie d'énergie n'était donc engendrée.

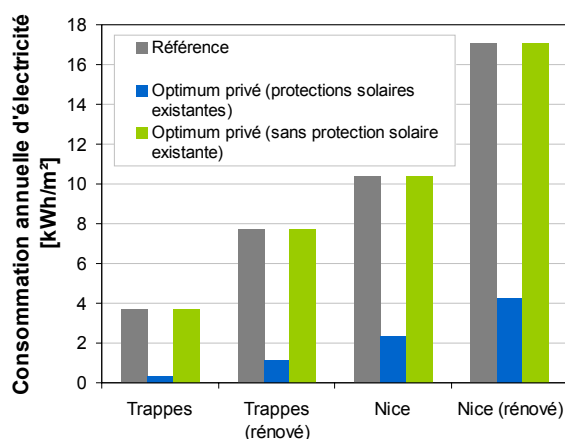


Figure 5.16. Comparaison des consommations unitaires de référence et des consommations correspondant aux optimums économiques privés

Selon nos résultats, des économies significatives peuvent déjà être réalisées en adoptant les configurations optimales du point de vue privé (évitement de la climatisation dans certains cas et réduction des consommations unitaires de climatisation dans d'autres).

Comme nous l'avons vu en partie 5.1.2.2, ceci ne signifie pas qu'une attitude de laisser-faire de la part des pouvoirs publics mènera à l'adoption par les agents privés de ces solutions optimales. En effet, il apparaît nécessaire de lutter contre les dysfonctionnements de marché et la rationalité limitée des agents privés en facilitant la recherche d'informations, la modification des habitudes... Différents instruments sont alors envisageables pour les pouvoirs publics (Clinch et Healy, 2000). Citons par exemple, les campagnes de sensibilisation, l'étiquetage des produits, les exigences de performances basées sur l'optimum privé.

5.2.3 Lutter contre la rationalité limitée des agents économiques privés : l'exemple des exigences minimales de performance portant sur les appareils de climatisation

Comme nous venons de le voir, si des économies significatives peuvent être réalisées en adoptant les configurations optimales du point de vue privé, des instruments sont nécessaires afin de lutter contre les dysfonctionnements de marché et la rationalité limitée des agents privés. L'objet de cette partie n'est pas d'effectuer un inventaire de l'éventail des possibilités s'offrant aux pouvoirs publics français mais de se concentrer sur une mesure particulière : la mise en place d'exigences minimales de performance portant sur les climatiseurs individuels.

5.2.3.1. Comparaison des optimums économiques aux exigences actuelles portant sur les climatiseurs

Exigences de performance existantes

S'il n'existe pas d'exigences minimales de performance à l'échelle européenne, la réglementation thermique « par élément » (RF, 2007) exige que les climatiseurs de puissance frigorifique inférieure ou égale à 12 kW installés soient au moins de classe B (étiquetage énergétique européen). L'étiquetage, actuellement basé sur les performances nominales des appareils, est donné dans le Tableau 5.12 ; les produits dont l'EER est inférieur ou égal à 3 sont donc interdits en France dans les bâtiments soumis à cette réglementation (voir chapitre 1).

Tableau 5.12. Classes d'efficacité énergétique pour les climatiseurs individuels air/air de type split et multi-split (CE, 2002)

Classe d'efficacité énergétique	Exigences pour les systèmes Split
A	$3,2 < EER$
B	$3,2 \geq EER > 3$
C	$3 \geq EER > 2,8$
D	$2,8 \geq EER > 2,6$
E	$2,6 \geq EER > 2,4$
F	$2,4 \geq EER > 2,2$
G	$2,2 \geq EER$

La prise en compte des performances saisonnières

Nous avons vu au chapitre 4 que le SEER était un meilleur indice de comparaison des efficacités énergétiques. Nous y avons étudié l'amélioration des performances des climatiseurs en partant d'un cas de référence (SEER=3) et en lui ajoutant des options d'amélioration par ordre d'efficacité économique. La Figure 5.17 présente la relation entre l'EER et le SEER obtenue lors de l'étude de l'amélioration des performances de ce climatiseur de référence (chapitre 4). Lorsque l'EER est de 3,1, le SEER varie de 3 à 4,2, ce qui traduit un effort sur le comportement à charge partielle qui ne peut être pris en compte par l'EER (compresseur à vitesse variable par exemple). Ensuite, l'EER et le SEER sont fortement corrélés (coefficient R^2 de 0,96).

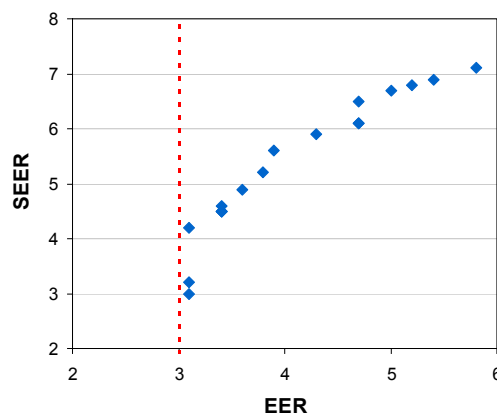


Figure 5.17. Relation EER-SEER obtenue au chapitre 4

Nous pouvons supposer que le niveau minimum exigé actuellement par la réglementation thermique « par élément » (RF, 2007) en matière de climatiseur correspond peu ou prou à notre appareil de référence : EER de 3,1 et SEER de 3. Il est cependant possible que des modèles respectent les exigences françaises en termes d'EER tout en étant moins efficaces que notre cas de référence en termes de SEER.

Comparaison aux optimums déterminés dans la partie précédente

Dans la partie précédente, nous avons déterminé les actions d'amélioration du confort d'été qui permettaient d'obtenir la climatisation au moindre coût. Ces configurations optimales comprennent la mise en place d'actions d'enveloppe et d'usage telles que le remplacement du système d'éclairage, ainsi que l'installation de climatiseurs généralement plus efficaces que l'appareil de référence.

Les efficacités saisonnières des appareils correspondant au minimum de CGA du point de vue privé sont rassemblées dans le Tableau 5.13. Si aucune amélioration de l'appareil de référence n'est justifiée pour les appartements, mettre en place des exigences plus rigoureuses que celle de la réglementation thermique « par élément » (RF, 2007) permettrait des économies d'énergie importantes qui ne coûteraient rien du point de vue privé dans les bureaux et les boutiques (comme nous le verrons en partie 5.4.1, ces deux secteurs représentent la majorité des surfaces climatisées en France).

Par la suite, nous étudions l'impact, sur les bilans économiques privés, de la mise en place d'une exigence de performance fixée à 4,5 d'efficacité saisonnière. Toutes choses égales par ailleurs, une telle exigence permettrait des économies d'énergie de 33 % par rapport à l'appareil de référence.

Tableau 5.13. Efficacité saisonnière de l'appareil correspondant au minimum de CGA du point de vue privé pour les différentes pièces de référence

		Pièce de bureaux	Appartement	Boutique
Trappes	Référence	4,2	3	3,2
	Rénové	4,5	3	4,2
Nice	Référence	4,5	3	4,5
	Rénové	4,5	3,2	4,5

5.2.3.2. Impact d'exigences plus rigoureuses

La Figure 5.18 présente l'évolution du CGA tenant compte des dépenses de climatisation en fonction de la consommation annuelle d'électricité. Nous avons supposé que les mesures incluses dans les optimums privés avaient été mises en place (remplacement de l'éclairage pour les bureaux et les boutiques, protections solaires pour les boutiques à Nice, volets pour les appartements) et nous faisons varier le SEER entre 3 et 7,1.

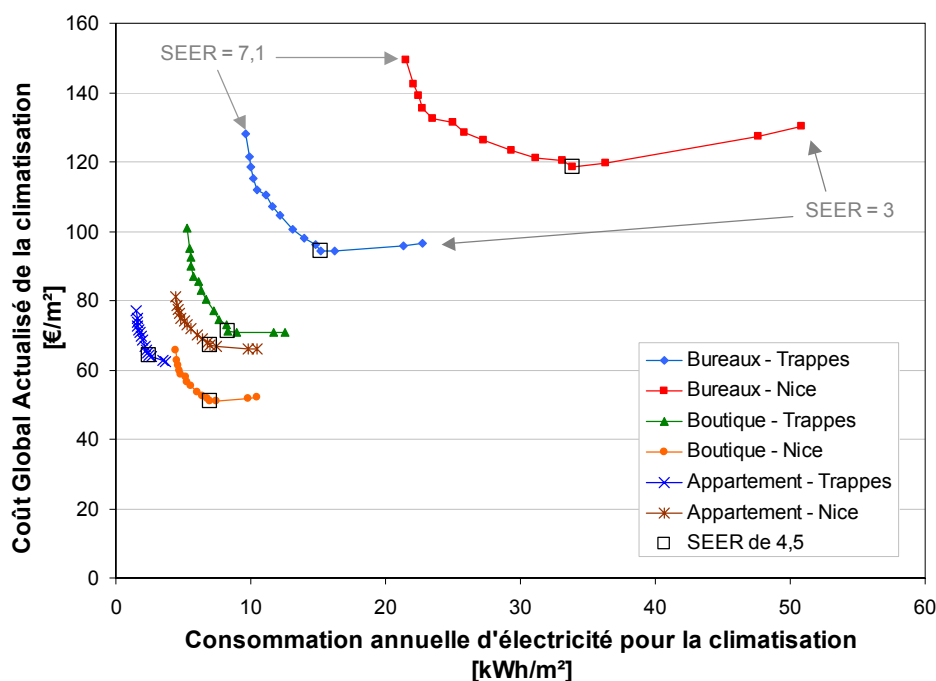


Figure 5.18. Evolution du CGA de la climatisation pour différentes valeurs de SEER (on se place aux optimums privés précédemment déterminés)

La courbe obtenue pour chaque pièce considérée est parabolique car l'amélioration de l'efficacité réduit la facture d'électricité mais augmente le coût d'investissement. On assiste donc à une réduction des coûts globaux jusqu'au moment où le surinvestissement initial n'est plus compensé par les économies réalisées sur la consommation d'électricité. Nous retrouvons sur la Figure 5.18 que l'efficacité saisonnière de valeur 4,5 correspond à l'optimum (ou presque) dans le cas des boutiques et des bureaux et à un faible surcoût en ce qui concerne les appartements.

Le Tableau 5.14 présente l'impact de l'exigence étudiée sur le CGA des occupants (en % par rapport au CGA de référence). Celle-ci se traduit principalement par des bénéfices dans le cas des bureaux et des boutiques, et par une faible augmentation des coûts, inférieure à 3 %, pour les appartements.

Tableau 5.14. Surcoûts (point de vue privé) par rapport à la situation de référence

		Exigence : SEER \geq 4,5		
		Pièce de bureaux	Appartement	Boutique
Trappes	Référence	- 2,5 %	+ 2,7 %	+ 0,2 %
	Rénové	- 5,6 %	+ 2,5 %	- 1,6 %
Nice	Référence	- 8,9 %	+ 1,8 %	- 2,4 %
	Rénové	- 11,5 %	+ 0,7 %	- 4,3 %

5.2.3.3. Recommandations quant aux exigences minimales de performance

D'après nos résultats, il semble justifié de mettre en place des exigences de performance en France, plus sévères que celle de la réglementation thermique « par élément » (RF, 2007). Comme nous venons de le voir, exiger que les climatiseurs installés en France aient un SEER supérieur à 4,5 permettrait, toutes choses égales par ailleurs, des économies d'énergie de 33 % par rapport à la situation de référence, tout en étant bénéficiaire pour l'acheteur dans le cas des bureaux et des boutiques. Dans le cas des appartements cette exigence entraînerait un léger surcoût, inférieur à 3 % en CGA.

5.2.4 L'adaptation au changement climatique : les transformations à prévoir concernant le confort d'été

L'ACB « privée », dont les résultats sont présentés pour l'année 2008 en partie 5.2.2, a été réalisée pour l'année 2050 en supposant un réchauffement du climat (voir le chapitre 3 concernant nos hypothèses de changement climatique) et une augmentation des prix des énergies (multiplié par un facteur 2 environ – voir la partie 5.1.2.3).

L'objectif de cette partie consiste à étudier l'influence du changement climatique et de l'augmentation du prix des énergies sur le bilan économique des agents privés et donc sur les tendances à prévoir, notamment en ce qui concerne le développement de la climatisation individuelle.

5.2.4.1. Le cas des pièces de bureau

La Figure 5.19 présente, dans le cas de la pièce de bureaux située à Trappes, le positionnement des différentes actions étudiées en fonction des bénéfices (exprimés par unité de surface) pouvant être réalisés par rapport à la situation de référence, et des degrés-heures d'inconfort.

Alors que la comparaison entre les meilleures combinaisons sans climatisation et celles intégrant la climatisation aboutissait à des bénéfices similaires en 2008 (partie 5.2.2.1), la climatisation devient réellement optimale à Trappes en 2050. En effet, la solution optimale sans climatisation engendre un surcoût de 100 €/m² par rapport à la configuration permettant la climatisation au moindre coût. Elle s'avère même moins avantageuse que la simple mise en place de l'appareil de climatisation de référence (SEER égal à 3).

Ce phénomène est bien sûr accentué dans les autres situations, à Nice et dans les pièces de bureaux rénovées. Selon nos hypothèses, le changement climatique se traduirait par une généralisation de la climatisation dans les bureaux.

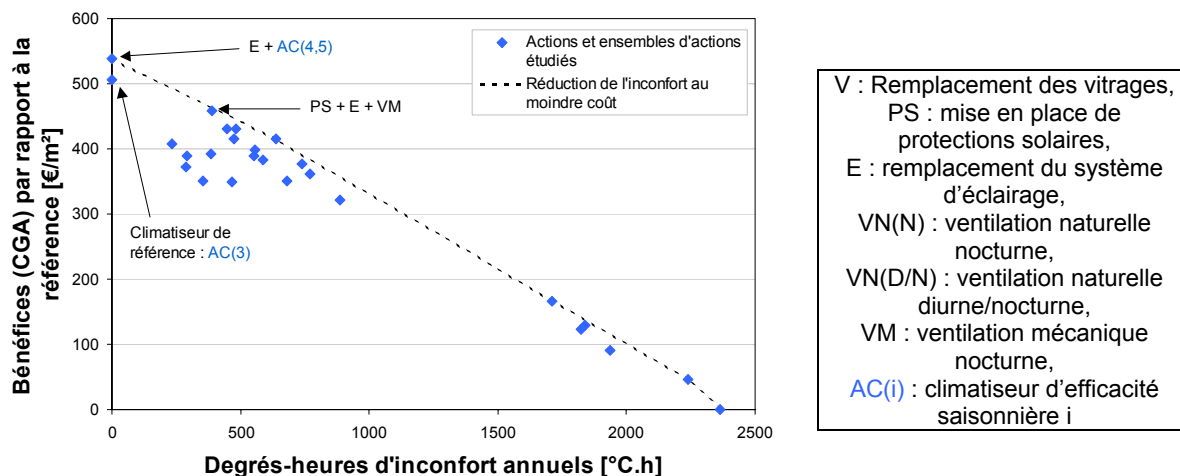


Figure 5.19. Bénéfices engendrés par les différentes actions étudiées en fonction de l'inconfort annuel pour la pièce de bureaux située à Trappes en 2050.

Le Tableau 5.15 présente les optimums économiques obtenus en 2008 et 2050 pour les pièces de bureaux climatisées. Comme en 2008, les solutions optimales correspondent à l'installation d'un climatiseur plus efficace que la moyenne du marché actuel (efficacité saisonnière de 3), mais aussi au remplacement du système d'éclairage. La prise en compte du changement climatique et de l'évolution du prix des énergies se traduit par une augmentation de l'efficacité des appareils. L'effort sur l'équipement est limité à Trappes (augmentation du SEER de 7 % et 0 %) et plus important à Nice (augmentation de 15 % et 45 %).

Tableau 5.15. Comparaison des optimums économiques dans les pièces climatisées en 2008 et 2050

	2008	2050
Trappes	E + AC(4,2)	E + AC(4,5)
Trappes – rénové	E + AC(4,5)	E + AC(4,5)
Nice	E + AC(4,5)	E + AC(5,2)
Nice – rénové	E + AC(4,5)	E + AC(6,5)

Dans l'hypothèse d'un remplacement programmé des vitrages (Tableau 5.16), alors cet investissement fait partie des combinaisons optimales (comme en 2008) mais l'augmentation de l'efficacité des appareils est alors réduite par rapports aux optimums présentés dans le Tableau 5.15.

Tableau 5.16. Comparaison des optimums économiques dans les pièces climatisées en 2008 et 2050 dans le cas d'un remplacement programmé des vitrages

	2008	2050
Trappes	V+E + AC(4,2)	V+E + AC(4,5)
Trappes – rénové	V+E + AC(4,5)	V+E + AC(4,5)
Nice	V+E + AC(4,5)	V+E + AC(4,5)
Nice – rénové	V+E + AC(4,5)	V+E + AC(5,2)

5.2.4.2. Le cas des boutiques

En ce qui concerne les boutiques, les configurations comprenant un climatiseur étaient déjà beaucoup plus avantageuses que les autres solutions. La prise en compte du changement climatique ne fait qu'amplifier la différence et nous nous concentrons ici uniquement sur les pièces climatisées.

Le Tableau 5.17 présente les solutions optimales en 2008 et 2050 pour des remplacements anticipé et programmé des vitrages. A Trappes, l'optimum privé correspond à des investissements plus importants à la fois sur l'équipement et sur l'enveloppe avec l'installation de protections solaires lorsque l'on suppose un remplacement anticipé des vitrages. A Nice au contraire, l'augmentation des besoins ne justifie aucun investissement supplémentaire.

Tableau 5.17. Comparaison des optimums économiques dans les pièces climatisées en 2008 et 2050

	Remplacement anticipé des vitrages		Remplacement programmé des vitrages	
	2008	2050	2008	2050
Trappes	E + AC(3,2)	E + PS + AC(4,5)	E + V + AC(3,2)	E + V + AC(4,5)
Trappes – rénové	E + AC(4,2)	E + PS + AC(4,5)	E + V + AC(4,2)	E + V + AC(4,5)
Nice	E + PS + AC(4,5)	E + PS + AC(4,5)	E + V + AC(4,5)	E + V + AC(4,5)
Nice – rénové	E + PS + AC(4,5)	E + PS + AC(4,5)	E + V + AC(4,5)	E + V + AC(4,5)

5.2.4.3. Le cas des pièces résidentielles

La Figure 5.20 présente, dans le cas de la pièce d'appartement à Trappes, le positionnement des différentes actions étudiées en fonction des bénéfices (exprimés par unité de surface) pouvant être réalisés par rapport à la situation de référence, et des degrés-heures d'inconfort.

Les deux points situés sur l'axe des ordonnées correspondent aux configurations permettant un confort total au moindre coût avec et sans action comportementale. Les autres points se rapportent aux actions d'enveloppe et d'usage du bâtiment mises en place sans climatisation. Les actions notées en rouge sont de nature comportementale.

Avec nos hypothèses de changement climatique, il apparaît que la configuration optimale à Trappes reste l'utilisation des volets et de la ventilation naturelle. Cependant, si la ventilation naturelle nocturne n'est pas envisageable, alors la meilleure solution consiste à installer un climatiseur et à utiliser efficacement les protections solaires existantes. Si la pièce n'est pas équipée de protections

solaires existantes mais que la ventilation nocturne est possible, alors la solution optimale consiste à installer des protections solaires extérieures. Enfin si aucune de ces actions comportementales n'est envisageable, alors les bénéfices maximaux sont obtenus en installant un climatiseur sensiblement plus efficace que celui de référence (3,2).

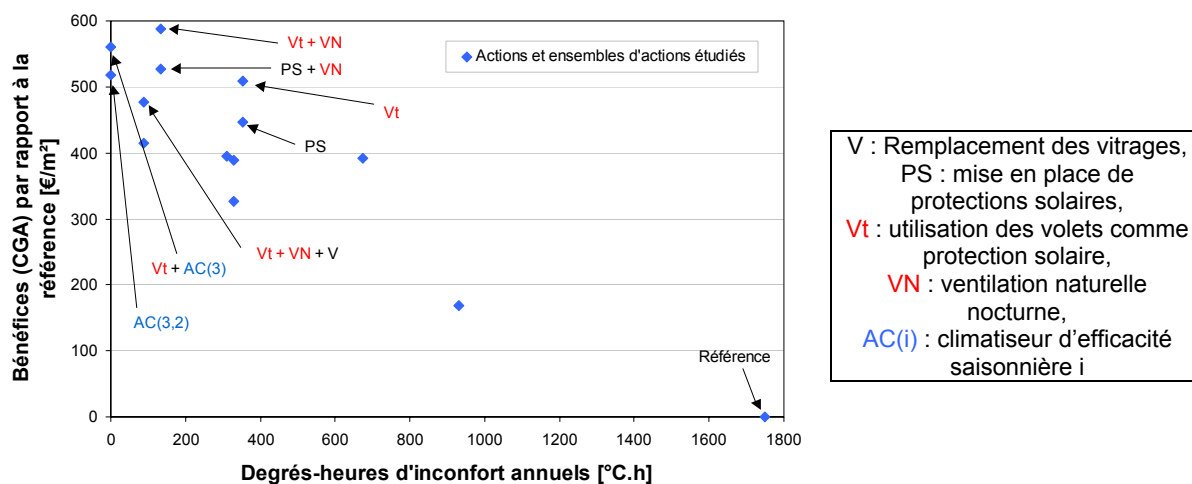


Figure 5.20. Bénéfices engendrés par les différentes actions étudiées en fonction de l'inconfort annuel pour la pièce résidentielle située à Trappes - 2050

A Nice, en 2050, les bénéfices engendrés par la combinaison des deux actions comportementales (utilisation efficace des volets et de la ventilation naturelle) et par la meilleure solution comprenant un climatiseur sont du même ordre (surcoût de 1 €/m² pour la solution climatisée). Si une de ces actions comportementales n'est pas envisageable, alors il est économiquement justifié de recourir à la climatisation. Les configurations optimales consistent alors à installer un climatiseur plus efficace que la moyenne du marché actuel combiné, lorsque c'est possible, à l'utilisation efficiente des protections solaires existantes.

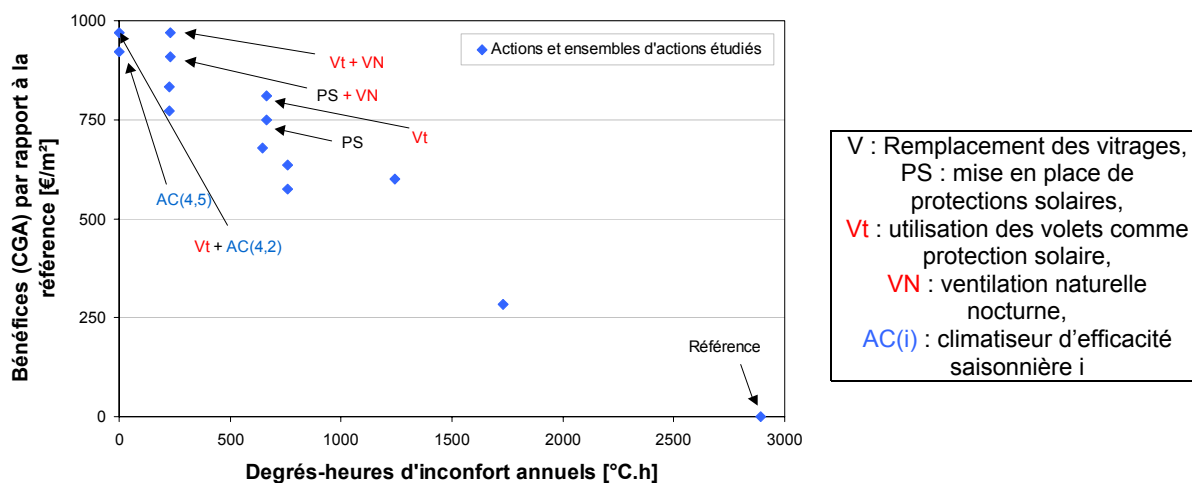


Figure 5.21. Bénéfices engendrés par les différentes actions étudiées en fonction de l'inconfort annuel pour la pièce résidentielle située à Nice - 2050

Le Tableau 5.18 présente les configurations dans lesquelles le recours à la climatisation est économiquement avantageux du point de vue privé. Avec nos hypothèses de coûts, les bénéfices d'une climatisation ne justifient pas son installation à Trappes lorsqu'il est possible de recourir à la ventilation naturelle nocturne. Pour l'appartement rénové à Trappes et celui de référence à Nice, les bénéfices des meilleures solutions sans climatisation et avec climatisation sont du même ordre et il

n'est pas possible de conclure à l'optimalité d'une des configurations. Dans tous les autres cas, la climatisation est pleinement justifiée si l'on se base sur le bilan économique privé, la climatisation résidentielle est donc fortement susceptible de se développer en France dans un contexte de changement climatique.

Tableau 5.18. Configurations dans lesquelles la climatisation est justifiée du point de vue privé. Il n'est pas possible de conclure pour certains cas (notés « = »).

	Trappes	Trappes (rénové)	Nice	Nice (rénové)
Protections solaires existantes + ventilation nocturne envisageable	Non justifiée	=	=	Justifiée
Ventilation nocturne envisageable	Non justifiée	Justifiée	Justifiée	Justifiée
Protections solaires existantes	Justifiée	Justifiée	Justifiée	Justifiée
Ni protection, ni ventilation	Justifiée	Justifiée	Justifiée	Justifiée

A l'instar des résultats obtenus pour l'année 2008, aucun effort supplémentaire sur l'enveloppe n'est justifié lorsque l'on recherche un confort total. Les solutions optimales (Tableau 5.19) correspondent alors à l'installation d'un climatiseur dont l'efficacité est généralement supérieure à la moyenne du marché actuel. Enfin, le fait de supposer un remplacement programmé des vitrages ne modifie en rien les résultats présentés ici.

Tableau 5.19. Optimums privés pour les pièces résidentielles climatisées

	Protections solaires existantes		Sans protections solaires existantes	
	2008	2050	2008	2050
Trappes	Vt + AC(3)	Vt + AC(3)	AC(3)	AC(3,2)
Trappes – renové	Vt + AC(3)	Vt + AC(3,2)	AC(3)	AC(4,2)
Nice	Vt + AC(3)	Vt + AC(4,2)	AC(3)	AC(4,5)
Nice – renové	Vt + AC(3)	Vt + AC(4,5)	AC(3)	AC(4,5)

5.2.4.4. Quelle perspective ?

De façon générale, l'ACB privée, réalisée ici dans un contexte de changement climatique et de hausse du prix des énergies, aboutit à la justification de l'installation de climatiseurs dans la quasi-totalité de nos pièces de référence. Si l'on se base sur le bilan économique privé, le changement climatique se traduirait alors par une généralisation de la climatisation dans les secteurs tertiaire et résidentiel. Des prix similaires au marché japonais (voir chapitre 4) augmenteraient cet attrait pour la climatisation, mais il est aussi fort probable que ceux des autres solutions (protections solaires...) diminueraient en cas de recours accru à ces solutions. Enfin, outre l'augmentation de la pénétration des climatiseurs, le changement climatique entraînerait également une élévation des consommations unitaires de la climatisation (voir Tableau 5.20).

Tableau 5.20. Consommations d'électricité liées à la climatisation pour les différentes pièces étudiées en 2008 et 2050 [KWh/m²]

			Pièce de bureaux	Appartement	Boutique
2008	Trappes	Référence	24,8	3,7	17,6
		Rénové	37,8	7,7	23,2
	Nice	Référence	54,4	10,4	37,1
		Rénové	69	17,1	43,1
2050	Trappes	Référence	40	8,4	29,7
		Rénové	50,6	12,7	34,1
	Nice	Référence	68,1	16,2	50,5
		Rénové	78,7	21,7	54,4

Les optimums privés représentent cependant un potentiel important de réduction des consommations d'énergie. La Figure 5.22 présente une comparaison des consommations unitaires de référence et des consommations correspondant aux optimums économiques privés. Dans le cas des bureaux, adopter la configuration optimale permet de réduire la consommation de climatisation de l'ordre de 40 - 60 % (remplacement anticipé des vitrages) à 50 - 70 % (remplacement programmé des vitrages). Ce potentiel d'économies varie de 45 % (remplacement anticipé des vitrages) à 75 % (remplacement programmé des vitrages) dans le cas des boutiques.

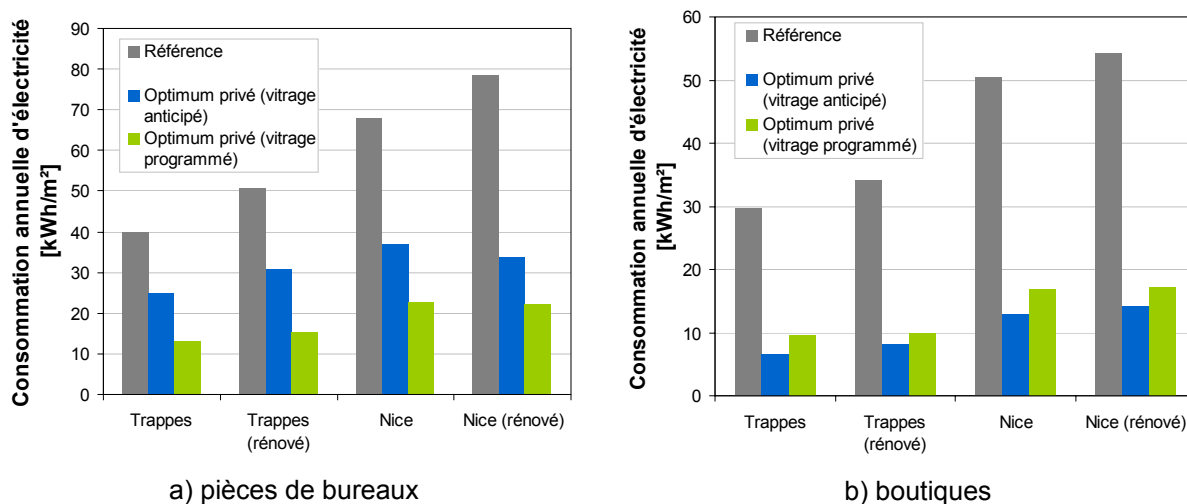


Figure 5.22. Comparaison des consommations unitaires de référence et de celles correspondant aux optimums économiques privés

La Figure 5.23 présente les potentiels de réduction des consommations électriques de climatisation dans le cas des pièces d'appartement. Une distinction est faite entre la situation où des protections solaires extérieures sont déjà présentes (volets) et celle où ce n'est pas le cas.

Dans la première configuration, le comportement des occupants peut permettre une très forte réduction des consommations unitaires (65 % - 75 %). Sans la présence de protections solaires, aucun investissement supplémentaire n'est justifié sur l'enveloppe mais l'installation d'appareils efficaces est économiquement avantageuse, ce qui est à l'origine d'économies d'énergie variant de 5 % (Trappes) à 30 % (Nice).

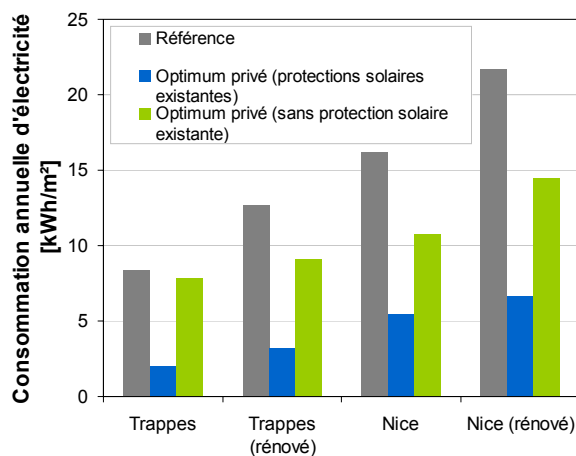


Figure 5.23. Comparaison des consommations unitaires de référence et de celles correspondant aux optimums économiques privés (résidences)

Comme nous l'avons vu en partie 5.2.2.4, la réalisation de ces économies d'énergie, qui n'entraînent aucune perte économique pour les agents privés, nécessitera de lutter contre les dysfonctionnements de marché et la rationalité limitée des agents privés. Ceci implique notamment une mise à jour régulière des instruments utilisés (tels que les exigences de performance) afin de tenir compte des évolutions des coûts, des technologies et du climat.

5.3 Analyse coût-bénéfice sociale d'amélioration du confort d'été

Alors que différentes actions d'amélioration du confort d'été ont été étudiées sous l'angle privé, nous les comparerons ici du point de vue sociétal en nous basant sur le CGA. Ceci nous permettra, dans un premier temps, de déterminer les actions à favoriser du point de vue de la société et d'étudier les conflits et synergies éventuels avec les configurations optimales du point de vue privé. Ensuite, nous évaluerons les coûts marginaux de réduction des consommations d'énergie qui représentent une information précieuse en matière d'investissement de maîtrise de la consommation énergétique. Enfin, l'influence du changement climatique et de l'augmentation du prix des énergies sur le bilan économique sera étudiée.

5.3.1 Synergies et conflits entre points de vue privé et sociétal

L'objet de cette partie est de réaliser une ACB du point de vue sociétal des actions d'amélioration du confort d'été décrites en partie 5.2.1. L'objectif principal étant de réduire les consommations d'énergie, nous avons choisi d'exprimer les bénéfices des différentes combinaisons d'actions en fonction d'une situation de référence consistant à installer un climatiseur d'efficacité saisonnière égale à 3. Par rapport à l'analyse précédente, le calcul du CGA intègre maintenant les coûts externes liés à la consommation d'énergie (5 €cts par kilowattheure électrique et 2 €cts par kilowattheure thermique – voir chapitre 2) et aux fuites de fluide frigorigène. Pour ces dernières, nous nous basons sur les résultats du chapitre 4 et supposons une quantité initiale de 300 g par kilowatt de puissance frigorifique, un taux de fuite annuel de 3 % et un taux de récupération de 95 % en fin de vie.

5.3.1.1. Le cas des pièces de bureaux

Les bénéfices de toutes les actions ou combinaisons d'actions décrites en partie 5.2.1 ont été calculés du point de vue sociétal. Les Figure 5.24 et Figure 5.25 présentent les résultats obtenus pour certaines valeurs de SEER dans les pièces de bureaux situées à Trappes et Nice, en fonction des économies annuelles d'électricité de climatisation (climatiseur et système de ventilation si ce dernier est utilisé). Seules les configurations engendrant des bénéfices supérieurs aux coûts sont présentées afin d'alléger les figures. Bien évidemment, les solutions permettant les économies d'électricité (liées à la climatisation) les plus importantes sont celles qui ne comprennent pas l'installation d'un climatiseur.

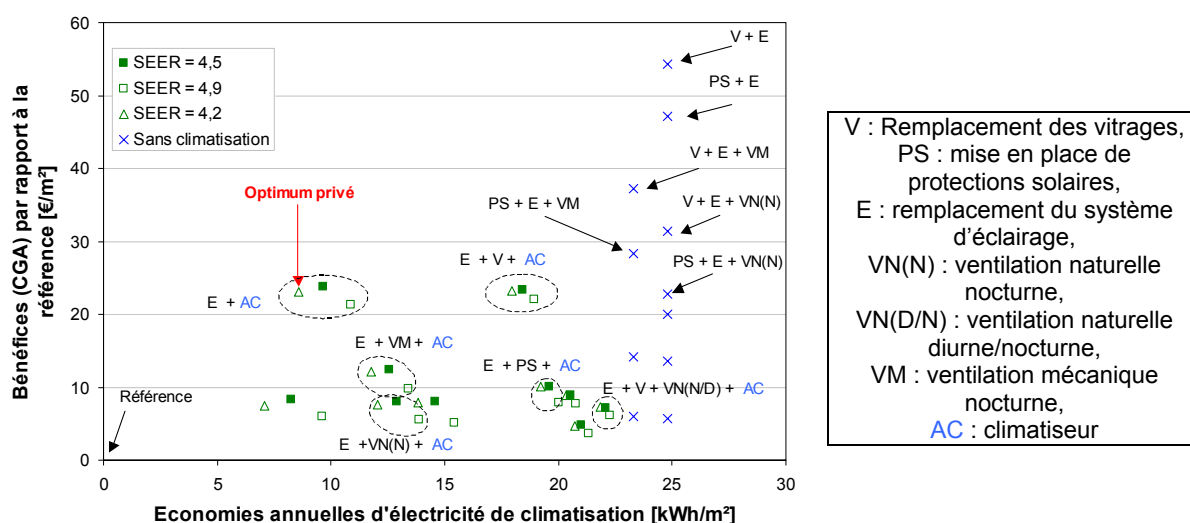


Figure 5.24. Bénéfices engendrés par les différentes actions étudiées en fonction de l'inconfort annuel pour la pièce de bureaux située à Trappes

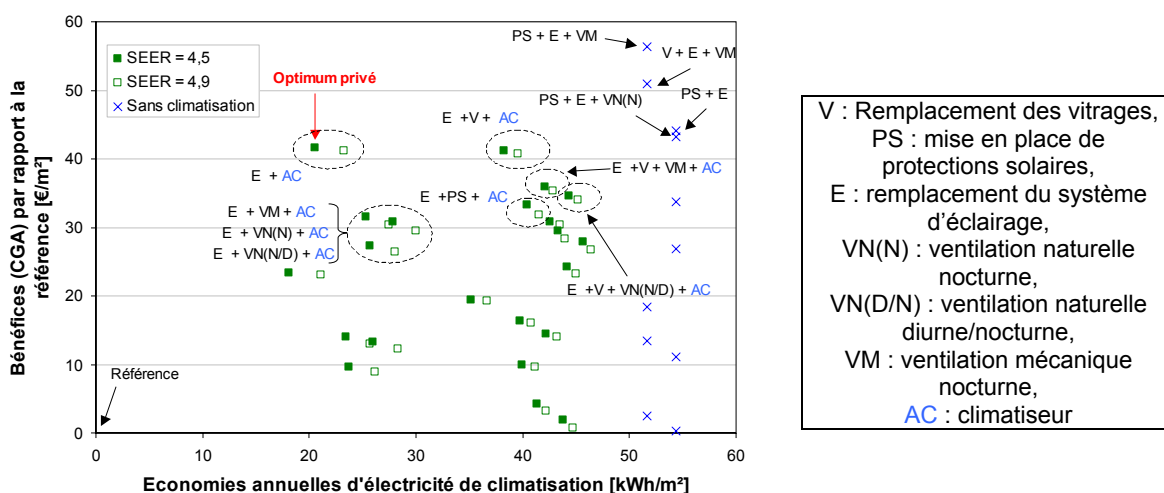


Figure 5.25. Bénéfices engendrés par les différentes actions étudiées en fonction de l'inconfort annuel pour la pièce de bureaux située à Nice

Optimums sociétaux : comparaison pièces climatisées/pièces non climatisées

Comme le montrent les Figure 5.24 et Figure 5.25, l'approche sociétale aboutit à des configurations optimales qui ne sont pas climatisées (les conclusions sont identiques pour les pièces rénovées). Dans le cas de Trappes, le meilleur arrangement consiste à remplacer l'éclairage et à mettre en place des protections solaires. A Nice, cet arrangement engendre des bénéfices plus importants que les configurations intégrant la pose d'un climatiseur mais la combinaison optimale comprend en plus l'installation d'un système de ventilation mécanique nocturne. Le surcoût sociétal des solutions avec climatisation par rapport à celles sans climatisation est de l'ordre de 30 €/m² à Trappes et 15 €/m² à Nice. Les résultats de la comparaison climatisé/non climatisé sont assez robustes puisqu'il faut augmenter nos coûts d'inconfort de 150 % pour que la combinaison optimale intègre un climatiseur à Trappes et de 50 % pour que ce soit le cas à Nice.

Les optimums sociétaux et privés sont regroupés dans le Tableau 5.21. Ils sont modifiés dans l'hypothèse d'un remplacement programmé des vitrages puisque cette dernière action devient alors plus avantageuse que les protections solaires.

Tableau 5.21. Optimums selon les deux approches et surcoût par rapport à l'optimum privé

	Climatisé - Privé	Climatisé - Sociétal	Surcoût – Privé (CGA)
Trappes	PS + E	V + E	+ 20 €/m²
Trappes - rénové	PS + E	PS + E	=
Nice	E + AC(4,5)	PS + E + VM	+ 10 €/m²
Nice - rénové	E + AC(4,5)	PS + E + VM	+ 10 €/m²

Il existe donc une opposition entre les résultats obtenus du point de vue privé qui aboutissaient à un optimum climatisé à Nice et ceux présentés ici qui montrent que les solutions optimales ne comprennent pas de climatiseur. Ce conflit peut aussi être soulevé pour Trappes puisque nous avons vu que les configurations sans climatiseur étaient très avantageuses dans le cas de l'approche sociétale alors que leurs bénéfices étaient similaires à ceux des meilleures solutions climatisées dans le cas de l'approche privée.

Pour comprendre les causes de cette modification, nous comparons, dans le cas de la pièce non rénovée à Nice, les coûts et bénéfices de la combinaison optimale du point de vue sociétal (remplacement de l'éclairage, mise en place de protections solaires et installation d'un système de ventilation nocturne) à ceux d'une des configurations climatisées les plus avantageuses (remplacement de l'éclairage et installation d'un climatiseur d'efficacité saisonnière égale à 4,5).

La Figure 5.26 présente les résultats obtenus. Les coûts sont exprimés négativement et regroupent les coûts d'inconfort, les coûts « d'enveloppe »¹⁴⁰ et les consommations d'éclairage (la mise en place de protections solaires les augmente). Les bénéfices comprennent la réduction des coûts externes liés aux fuites de fluide frigorigène et les économies liées au fait de ne pas utiliser de climatiseur (deux postes : électricité d'une part, le reste (achat, maintenance) d'autre part). Nous retrouvons le fait que l'action sans climatisation est préférable du point de vue sociétal (15 €/m² de bénéfice en plus) et ne l'est pas du point de vue privé (surcoût de 10 €/m²).

L'action combinée d'un taux d'actualisation plus faible et des externalités (fuites de fluide frigorigène et consommation d'électricité) rend les bénéfices sociétaux plus élevés que les bénéfices privés de 18 €/m² (augmentation de 15 %) alors que les coûts diminuent de 8 €/m² environ (réduction de 6 %) sous les effets contradictoires de la non considération de la TVA et du taux d'actualisation plus faible (qui fait augmenter les coûts d'inconfort). Dans le cas de la non récupération des fluides, les coûts externes associés passeraient de 5 €/m² à 15€/m², augmentant les bénéfices sociétaux de 65 % environ.

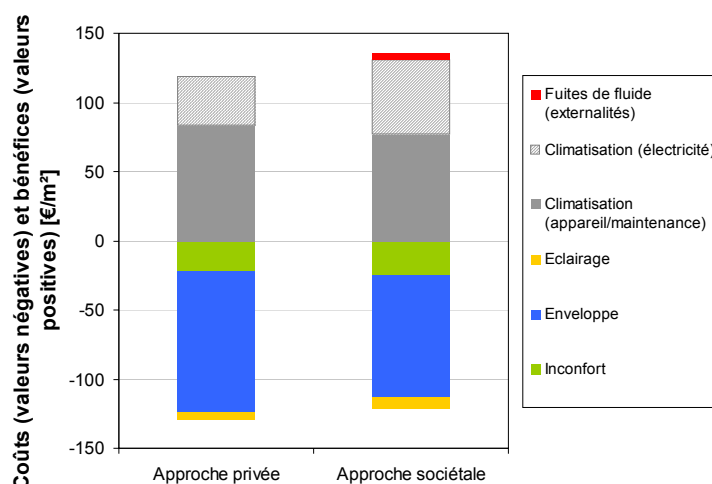


Figure 5.26. Ventilation des coûts et bénéfices de l'action (PS + E + VM)¹⁴¹ par rapport à l'action (E + AC(4,5))¹⁴² dans le cas de la pièce de bureaux à Nice

Afin d'estimer dans quelle mesure la prise en compte des coûts d'inconfort sonore pouvait influencer le bilan économique sociétal, nous avons supposé que les pièces climatisées, dont les fenêtres restent toujours fermées, permettaient de garantir des niveaux de confort acoustique satisfaisants et sans coûts externes. Au contraire, l'utilisation des fenêtres expose les occupants à des nuisances sonores évaluées à 52 €/personne/an dans le cas d'une rue résidentielle¹⁴³ et à 156 €/personne/an dans le cas d'une rue où la circulation est importante. La prise en compte de ces coûts d'inconfort réduit alors les bénéfices des configurations sans climatisation respectivement de 30 €/m² et 85 €/m². A Trappes (Figure 5.24), lorsque l'on prend en compte les nuisances sonores, les meilleures solutions avec climatisation ont des bénéfices similaires à celles sans climatisation dans le cas d'une rue résidentielle. Elles deviennent cependant plus avantageuses dans le cas d'une rue où la circulation est importante. A Nice (Figure 5.25), la prise en compte des coûts d'inconfort rend optimales les solutions intégrant la climatisation.

Cette évaluation rudimentaire montre donc que l'inconfort sonore peut justifier socialement le recours à la climatisation dans les pièces de bureaux.

¹⁴⁰ Coût des protections solaires, du système de ventilation mécanique, de la consommation d'électricité de ce système, en tenant compte des valeurs résiduelles.

¹⁴¹ Remplacement de l'éclairage, mise en place de protections solaires et installation d'un système de ventilation nocturne.

¹⁴² Remplacement de l'éclairage et installation d'un climatiseur d'efficacité saisonnière égale à 4,5.

¹⁴³ Voir chapitre 2.

En adoptant le point de vue sociétal, nous trouvons que la maximisation des bénéfices pour la société s'obtient en remplaçant le système d'éclairage et en mettant en place des protections solaires et des systèmes de ventilation mécanique sans recourir à la climatisation (à condition, toujours, que l'ouverture des fenêtres soit possible et que les nuisances sonores soient peu importantes).

Ces résultats mettent en évidence l'existence d'un premier conflit entre points de vue sociétal et privé puisque ce dernier aboutissait à la justification de la climatisation. Des actions publiques seraient a priori légitimes dans le but de rapprocher l'optimum privé de l'optimum sociétal, notamment en jouant sur le signal prix. Une réduction de la TVA sur les protections solaires et les systèmes de ventilation nocturne pourrait être envisagée.

Solutions optimales dans les pièces climatisées

Comme le montrent les Figure 5.24 et Figure 5.25, deux configurations climatisées engendrent des bénéfices similaires. Il s'agit du remplacement de l'éclairage associé à une amélioration de l'appareil et de la solution qui y associe, en plus, un remplacement des vitrages. Notre objectif étant la réduction des consommations d'énergie, nous considérons que l'optimum sociétal comprend le remplacement des vitrages qui permet les économies d'énergie les plus importantes et devient vraiment plus avantageuse en cas de remplacement programmé.

Au final, les optimums sociétaux et privés sont présentés dans le Tableau 5.22 pour les 4 pièces de référence. Un effort supplémentaire est justifié sur l'enveloppe des bâtiments avec l'installation de vitrages à faible facteur solaire et sur les équipements pour la pièce de référence à Trappes et la pièce rénovée à Nice. Ces nouvelles actions représentent un surcoût, par rapport à l'optimum privé, de l'ordre de 50 €/m². Les optimums sociétaux permettent ici d'économiser deux fois plus d'électricité (pour la climatisation) que l'optimum privé (Figure 5.24 et Figure 5.25).

Tableau 5.22. Optimums privés et sociétaux et surcoût par rapport à l'optimum privé

	Climatisé - Privé	Climatisé - Sociétal	Surcoût – Privé (CGA)
Trappes	E + AC(4,2)	E + V + AC(4,5)	+ 50 €/m ²
Trappes - rénové	E + AC(4,5)	E + V + AC(4,5)	+ 60 €/m ²
Nice	E + AC(4,5)	E + V + AC(4,5)	+ 45 €/m ²
Nice - rénové	E + AC(4,5)	E + V + AC(4,9)	+ 50 €/m ²

Cependant, dans l'hypothèse d'un remplacement programmé des vitrages, alors cette action est justifiée tant du point de vue privé que du point de vue sociétal et le surcoût de l'optimum sociétal est beaucoup plus limité pour l'agent économique privé (inférieur à 2 €/m²).

Tableau 5.23. Optimums privés et sociétaux et surcoût par rapport à l'optimum privé

	Climatisé - Privé	Climatisé - Sociétal	Surcoût – Privé (CGA)
Trappes	E + V + AC(4,2)	E + V + AC(4,5)	+ 20 €/m ²
Trappes - rénové	E + V + AC(4,5)	E + V + AC(4,5)	=
Nice	E + V + AC(4,5)	E + V + AC(4,5)	=
Nice - rénové	E + V + AC(4,5)	E + V + AC(4,9)	+ 1,5 €/m ²

En adoptant le point de vue sociétal lors de l'étude des pièces climatisées, nous trouvons que la maximisation des bénéfices pour la société s'obtient en remplaçant le système d'éclairage et en mettant en place des vitrages à faible facteur solaire même lorsque leur remplacement n'est pas programmé. Concernant les appareils, les niveaux d'efficacité saisonnière requis sont compris entre 4,5 et 4,9.

La Figure 5.27 présente les réductions des consommations d'énergie justifiée par l'approche sociétale, elles sont de l'ordre de 70 %. La mise en place des actions optimales du point de vue sociétal s'effectue pour l'agent économique privé à un faible coût dans le cas d'un remplacement programmé mais des actions publiques seraient justifiées pour favoriser le remplacement anticipé des vitrages.

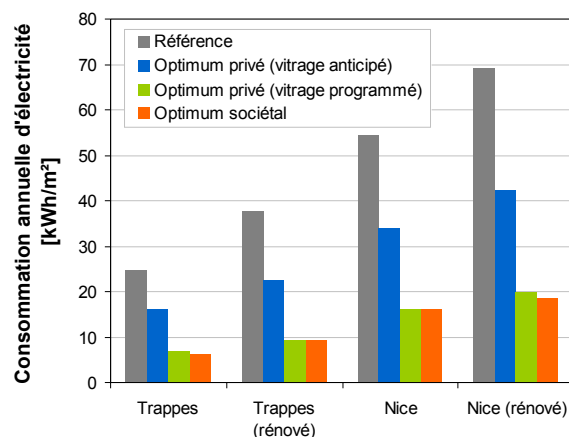


Figure 5.27. Comparaison des consommations unitaires de référence et des consommations correspondant aux optimums privés et sociétaux

5.3.1.2. Le cas des boutiques

Les Figure 5.28 et Figure 5.29 présentent les bénéfices sociétaux de différentes combinaisons d'actions pour les boutiques. Les combinaisons ne comprenant pas de climatiseur ne sont pas représentées car celles-ci ne sont pas avantageuses par rapport à notre situation de référence. Dans le cas de Trappes, elles engendrent au mieux un surcoût de l'ordre de 100 €/m² en raison de coûts d'inconfort élevés.

Dans le cas de Trappes, le meilleur arrangement consiste à remplacer l'éclairage et à mettre en place des protections solaires alors que seul le remplacement de l'éclairage faisait partie de l'optimum privé. Cette configuration permet des économies d'énergie liée à la climatisation deux fois plus importantes. La mise en place d'une vitre à faible facteur solaire ou d'un système de ventilation mécanique nocturne apporte moins de bénéfice sans permettre d'augmenter les économies.

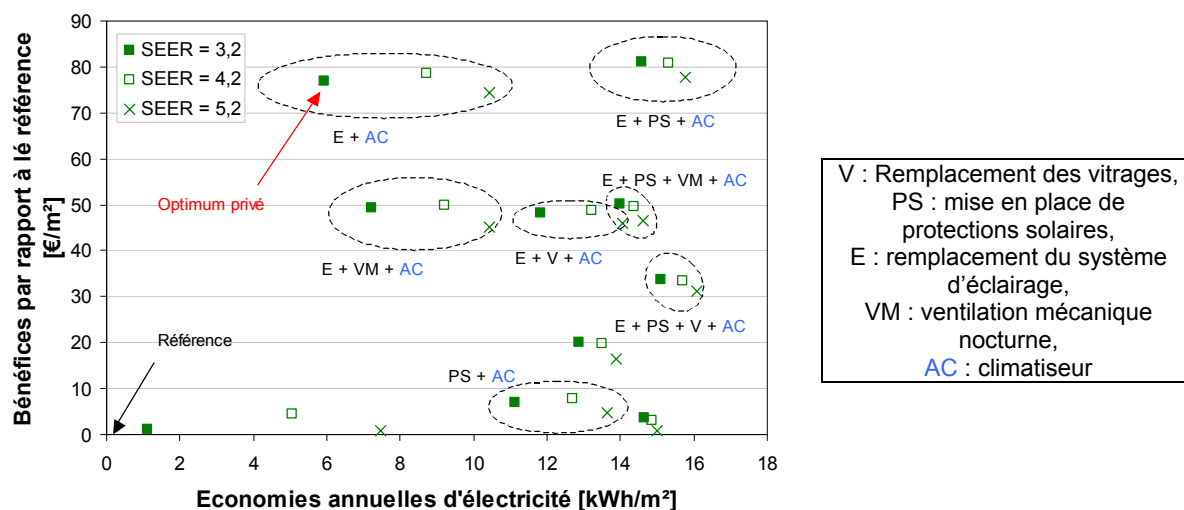


Figure 5.28. Bénéfices engendrés par les différentes actions étudiées en fonction de l'inconfort annuel pour la boutique située à Trappes

Comme le montre la Figure 5.29, il n'y a pas de modification entre l'optimum sociétal et l'optimum privé dans le cas de Nice.

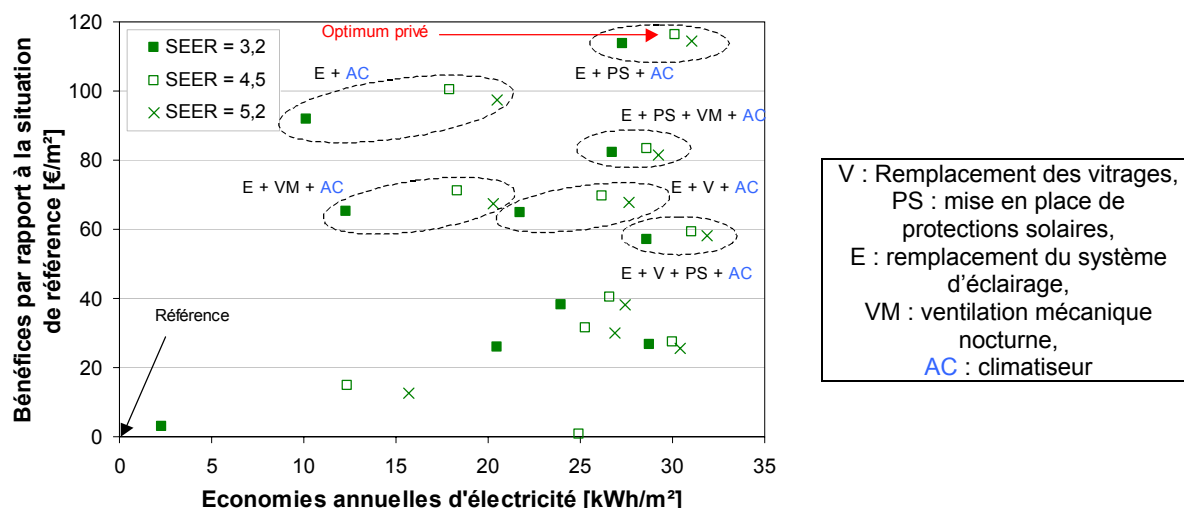


Figure 5.29. Bénéfices engendrés par les différentes actions étudiées en fonction de l'inconfort annuel pour la boutique située à Nice

Le Tableau 5.24 regroupe les optimums privé et sociétal dans le cas des boutiques. Les résultats obtenus pour Nice montrent une synergie entre les deux points de vue. Dans le cas de Trappes, il serait justifié d'inciter les agents économiques privés à mettre en place des protections solaires (surcoût de 5 €/m² du point de vue privé).

Tableau 5.24. Optimums privés et sociétaux dans le cas des boutiques

	Climatisé - Privé	Climatisé - Sociétal
Trappes	E + AC(3,2)	E + PS + AC(3,2)
Trappes - rénové	E + AC(4,2)	E + PS + AC(4,5)
Nice	E + PS + AC(4,5)	E + PS + AC(4,5)
Nice - rénové	E + PS + AC(4,5)	E + PS + AC(4,5)

La Figure 5.30 présente les réductions des consommations d'énergie justifiées par l'approche sociétale, elles sont de l'ordre de 80 – 90 % par rapport à la situation de référence.

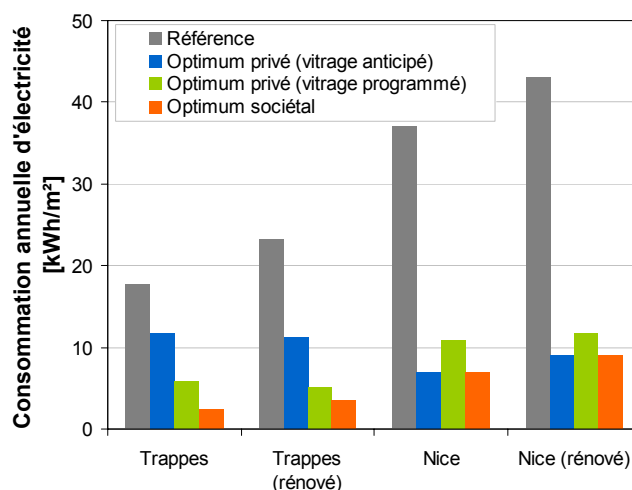


Figure 5.30. Comparaison des consommations unitaires de référence et des consommations correspondant aux optimums privés et sociétaux

5.3.1.3. Le cas des pièces résidentielles

La Figure 5.31 présente, dans le cas de la pièce d'appartement située à Nice, le positionnement des différentes actions étudiées en fonction des bénéfices (exprimés par unité de surface) pouvant être réalisés par rapport à la situation de référence, et des degrés-heures d'inconfort.

Avec nos hypothèses de coût, les bénéfices d'une climatisation sont inférieurs de l'ordre de 40 – 60 €/m² à ceux d'une pièce non climatisée même lorsqu'il n'est pas possible de recourir à la ventilation naturelle nocturne et qu'il n'y a pas de protections solaires existantes.

Dans le cas des pièces résidentielles, l'approche sociétale ne fait que confirmer les résultats obtenus du point de vue privé. Lorsque l'ouverture des fenêtres est possible, les solutions optimales du point de vue sociétal sont identiques aux optimums privés, rassemblés dans le Tableau 5.10. Cependant, à l'instar des résultats obtenus du point de vue privé, la prise en compte des coûts d'inconfort justifie socialement l'usage de la climatisation dans le cas d'une rue où la circulation est importante¹⁴⁴.

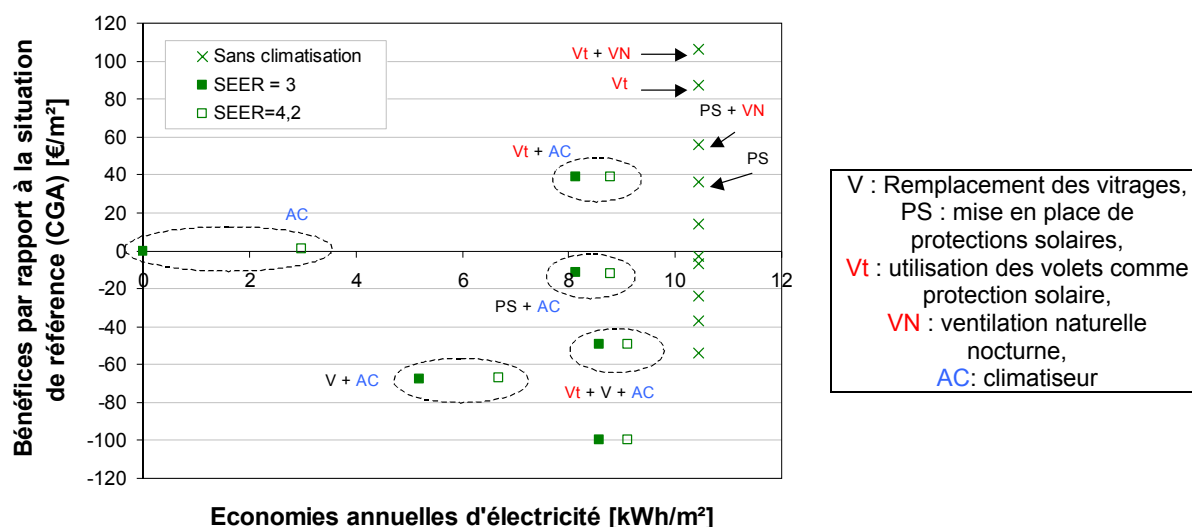


Figure 5.31. Bénéfices engendrés par les différentes actions étudiées en fonction de l'inconfort annuel pour l'appartement situé à Nice

En ce qui concerne les pièces climatisées, les solutions optimales sont présentées dans le Tableau 5.25. Les différences entre approches privée et sociétale sont faibles, aucun investissement sur l'enveloppe n'est justifié (la protection solaire représente un surcoût compris entre 20 €/m² à Trappes et moins de 2 €/m² à Nice (rénové)) et les efficacités saisonnières requises du point de vue sociétal sont plus élevées mais restent inférieures à l'exigence étudiée en partie 5.2.3.

Tableau 5.25. Optimums sociétaux pour les pièces résidentielles climatisées

	Volets disponibles	Pas de volet disponible
Trappes	Vt + AC(3)	AC(3)
Trappes – renové	Vt + AC(3)	AC(3,2)
Nice	Vt + AC(3)	AC(4,2)
Nice – renové	Vt + AC(3)	AC(4,2)
Vt : utilisation des volets comme protection solaire, AC(i) : climatiseur d'efficacité saisonnière i		

¹⁴⁴ La monétisation retenue au chapitre 2 était de 156 €/personne/an.

5.3.2 Réduction des consommations d'énergie liées au confort d'été, une analyse coût-efficacité

Dans la partie précédente, suivant les principes de l'ACB, nous avons évalué des actions d'amélioration du confort d'été en comparant l'ensemble des avantages à l'ensemble des coûts. L'objectif est ici d'évaluer ces mêmes actions sous l'angle coût efficacité, ce qui revêt un double intérêt puisque cela permet d'obtenir des courbes de réduction des consommations d'énergie (qui représentent une information précieuse en matière d'investissement de maîtrise de la consommation énergétique) tout en en faisant fi de notre monétisation des externalités qui est par nature incertaine.

5.3.2.1. Analyse des courbes de réduction des consommations d'énergie dans les cas où l'ouverture des fenêtres n'est pas envisageable

Dans cette section, nous nous concentrons sur les pièces dans lesquelles l'ouverture des fenêtres n'est pas envisageable en été (nuisances sonores, exigences élevées en termes de confort...). En raison des interactions (éclairage, chauffage), nous avons évalué les coûts marginaux de réduction des consommations sur la base des économies d'énergie primaire¹⁴⁵. La situation de référence reste l'installation d'un appareil moyen sur le marché actuel (efficacité saisonnière égale à 3).

Le cas des pièces de bureaux

La Figure 5.32 présente la courbe de réduction des consommations d'énergie dans le cas de la pièce de bureaux à Nice. Cette figure montre à la fois les coûts marginaux et l'évolution de la consommation électrique de climatisation, et cela, en fonction des économies d'énergie primaire. Dans la consommation de climatisation, la consommation du système de ventilation mécanique est incluse lorsqu'il y est fait recours. Les coûts marginaux sont estimés avec et sans les externalités telles que nous les avons monétisées.

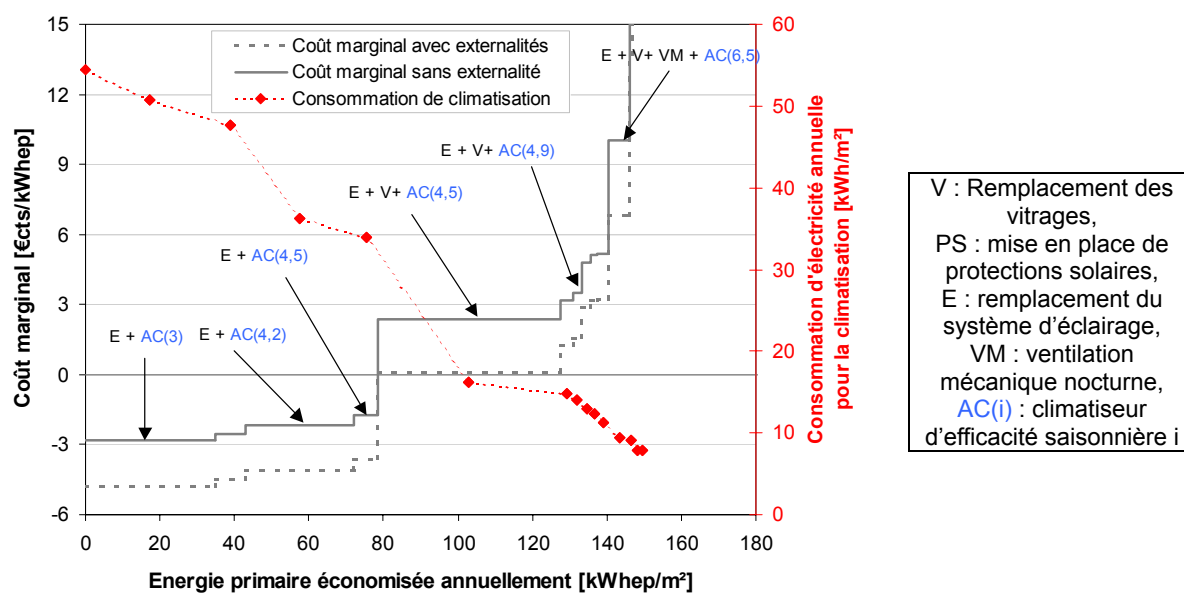


Figure 5.32. Courbe de réduction des consommations d'énergie – cas de la pièce de bureaux à Nice

L'expression des coûts marginaux comprenant les externalités permet de recouper ces résultats avec les conclusions de la partie précédente. En effet, la meilleure action sociétale (minimum de CGA) correspond à la dernière action au coût négatif ou nul. On retrouve dans le cas étudié ici, que la

¹⁴⁵ Les coefficients de conversion considérés sont ceux de la réglementation thermique française : 2,58 kWh d'énergie primaire pour produire 1 kWh d'énergie finale électrique et 1 kWh d'énergie primaire pour produire 1 kWh d'énergie finale d'origine fossile.

configuration comprenant le remplacement de l'éclairage, des vitrages et l'installation d'un appareil plus efficace correspond à l'optimum sociétal. La mise en place de cette combinaison s'effectue à des coûts marginaux, hors externalité, inférieurs à 2 €cts par kilowattheure d'énergie primaire économisé.

Dans le cas présenté ici (Figure 5.32), il est possible de réduire la consommation de climatisation de 40 % à des coûts marginaux négatifs, et de 70 % à des coûts inférieurs à 3 €cts/kWh_{ep}. L'obtention d'économies supplémentaires se révèle assez coûteuse. Atteindre le seuil de 80 % nécessite ainsi de réaliser des actions ayant un coût marginal de 10 €cts/kWh_{ep}.

La Figure 5.33 rassemble les résultats obtenus pour les quatre pièces de bureaux. Elle présente les coûts marginaux de réduction des consommations d'énergie primaire en fonction du potentiel de réduction de la consommation électrique de climatisation atteignable. Il résulte de ce travail qu'il est possible de réduire de 40 – 50 % la consommation électrique de climatisation à des coûts marginaux négatifs. En revanche abaisser cette consommation d'un facteur 4 s'effectue à des coûts marginaux de l'ordre de 4 €cts/kWh_{ep}.

Le cas des boutiques

Un travail similaire a été effectué pour les boutiques. La Figure 5.34 rassemble les résultats obtenus en présentant les coûts marginaux à accepter en fonction du potentiel de réduction de la consommation de climatisation atteignable. Il résulte de ce travail qu'il est possible de réduire de 80 % la consommation électrique à des coûts négatifs.

Ce niveau de réduction, comme nous l'avons vu, s'obtient en combinant, protections solaires, remplacement de l'éclairage et installation d'équipements plus efficace que l'appareil de référence.

Le cas du secteur résidentiel

Concernant le secteur résidentiel, une distinction est faite entre la situation où la pièce est déjà équipée de protections solaires (volets) et la situation où ce n'est pas le cas. Dans la première configuration, la courbe de réduction des consommations d'énergie (Figure 5.35) montre qu'il est possible de réduire de 80 % les consommations de climatisation à un coût négatif. Dans la deuxième configuration (Figure 5.36), le potentiel de réduction des consommations de climatisation à un coût négatif est inférieur à 10 %, et les coûts marginaux s'accroissent ensuite très fortement.

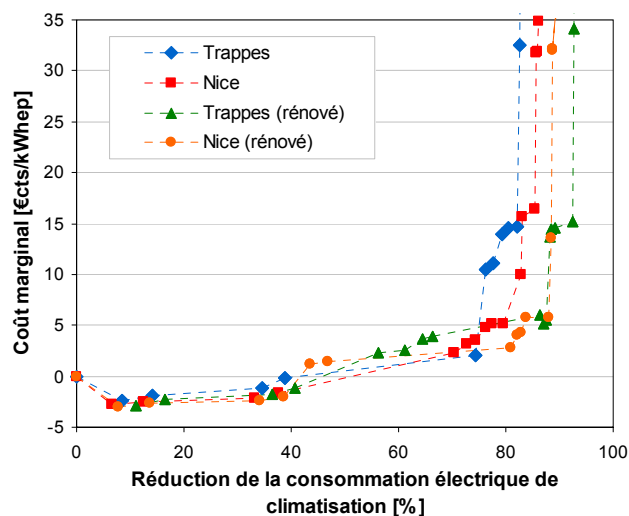


Figure 5.33. Coût marginal de réduction de la consommation d'énergie primaire en fonction du potentiel de réduction de la consommation de climatisation dans les bureaux

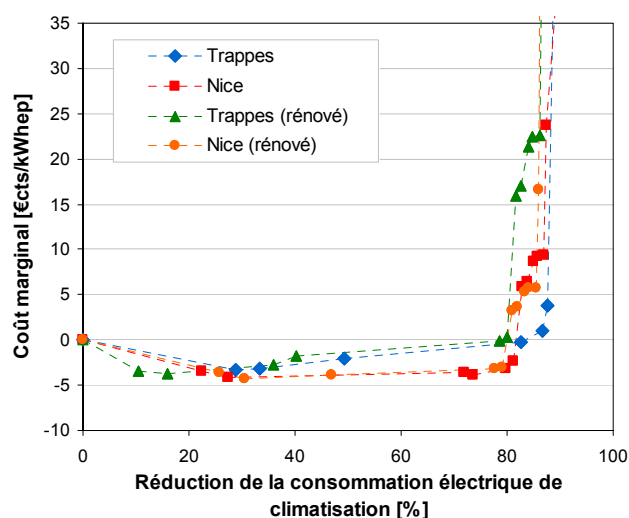


Figure 5.34. Coût marginal de réduction de la consommation d'énergie primaire en fonction du potentiel de réduction de la consommation de climatisation dans les boutiques

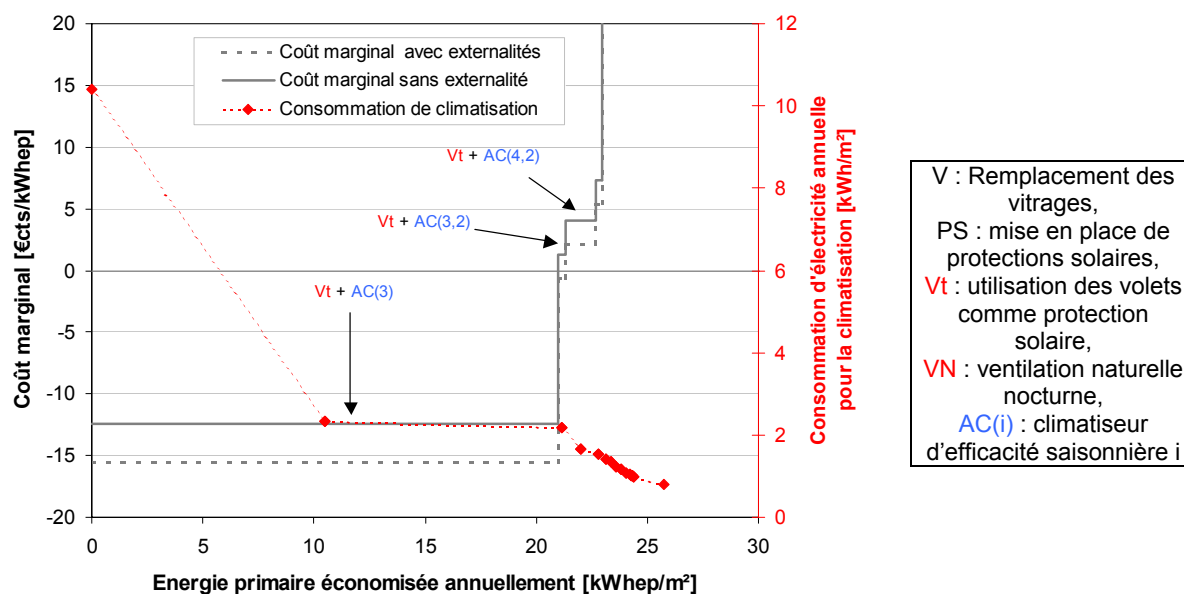


Figure 5.35. Courbe de réduction des consommations d'énergie – cas de la pièce d'appartement située à Nice avec des protections solaires existantes

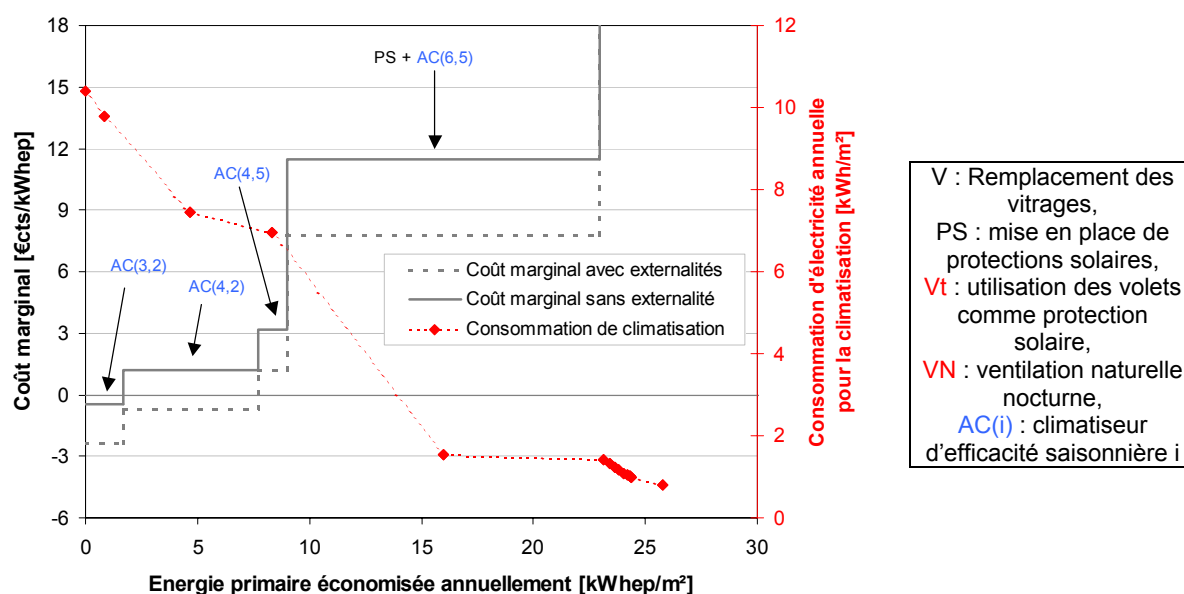


Figure 5.36. Courbe de réduction des consommations d'énergie – cas de la pièce d'appartement située à Nice sans protections solaires existantes

La Figure 5.37 généralise les résultats obtenus pour les différentes pièces d'appartement étudiées. Il apparaît qu'il est possible de réduire de 80 à 90 % les consommations de climatisation en utilisant les protections solaires existantes. Lorsqu'elles ne sont pas disponibles, une réduction de 25 % des consommations de climatisation s'obtient à des coûts marginaux compris entre 0 et 5 €cts/kWh, en augmentant l'efficacité de l'appareil installé.

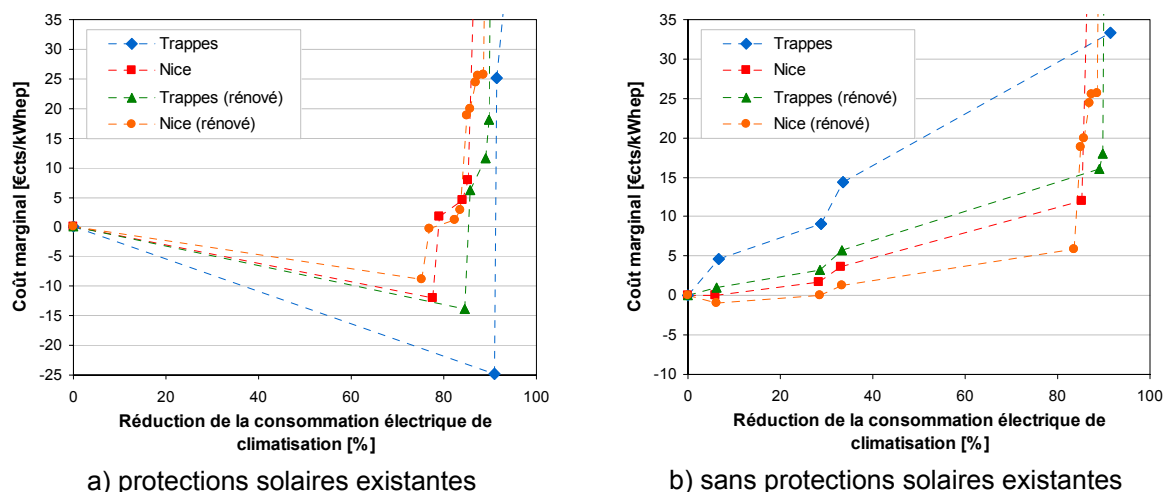


Figure 5.37. Coûts marginaux de réduction obtenus pour les différentes pièces d'appartement

Les courbes de réduction des consommations d'énergie obtenues dans cette partie montrent que le confort d'été représente un potentiel d'économies d'énergie important pouvant être réalisé à des coûts négatifs ou nuls. Ainsi, le remplacement du système d'éclairage et l'augmentation de l'efficacité saisonnière des climatiseurs installés permet de réduire d'environ 40 % les consommations de climatisation dans les bureaux. Ce potentiel atteint 80 % pour les boutiques si l'on y ajoute l'installation de protections solaires.

5.3.2.2. Analyse des courbes de réduction des consommations d'énergie tenant compte des pièces climatisées et non climatisées

La méthode de monétisation de l'inconfort thermique décrite au chapitre 2 permet la comparaison entre pièces climatisées et non climatisées. Il devient alors possible, en intégrant l'inconfort dans l'évaluation des coûts, de placer des solutions sans climatisation dans nos courbes de réduction.

La Figure 5.38 présente le cas de la pièce de bureaux à Nice. En accord avec les résultats précédents, nous retrouvons que l'optimum sociétal (avec nos hypothèses d'externalités) correspond à une configuration sans climatisation (« PS + E + VM »). Cette configuration permet d'économiser plus de 95 % des consommations électriques de climatisation (il reste les consommations du ventilateur) à un coût marginal inférieur à environ 1 €/kWhep.

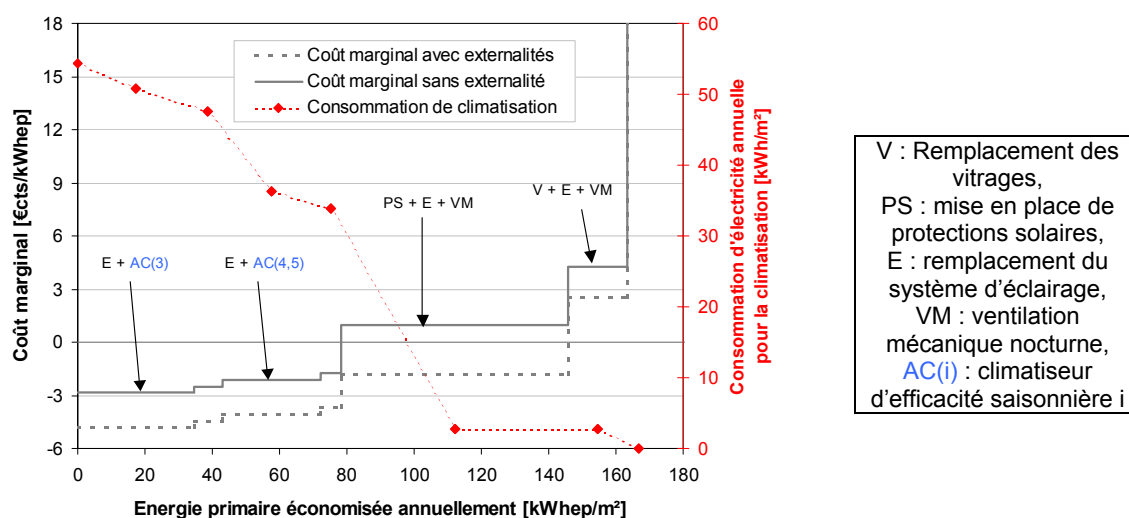


Figure 5.38. Courbe de réduction des consommations d'énergie – cas de la pièce de bureaux située à Nice

Si l'on généralise le raisonnement à l'ensemble des pièces de bureaux étudiées, il est possible d'empêcher la climatisation à un coût marginal inférieur à - 2 €/kWhep à Trappes et à 1 cts à Nice. Au même coût, en ne considérant que les solutions climatisées, nous avons abouti à un potentiel de réduction de la consommation d'énergie de la climatisation de 50 % (Figure 5.33).

Dans les résidences, le coût marginal des actions à entreprendre pour empêcher l'installation de la climatisation dépend de la possibilité d'utiliser des protections solaires existantes et de recourir à la ventilation naturelle nocturne. Le Tableau 5.26 regroupe les résultats obtenus et dans le pire des cas (aucune action comportementale possible), l'évitement de la climatisation s'effectue à un coût négatif à Trappes et à Nice.

Tableau 5.26. Coûts marginaux de réduction de la consommation d'énergie primaire permettant d'éviter la climatisation

Actions comportementales possibles	Trappes	Nice
Volet	- 70 €/kWhep	- 30 €/kWhep
Ventilation nocturne	- 45 €/kWhep	- 20 €/kWhep
Volet + ventilation nocturne	- 75 €/kWhep	- 35 €/kWhep
Aucune	- 25 €/kWhep	- 10 €/kWhep

En intégrant les coûts d'inconfort thermiques, nos résultats montrent que conserver les pièces de bureaux et de résidences non climatisées en mettant en place des mesures d'enveloppe, est à l'origine d'un potentiel d'économies d'énergie important (en évitant les consommations des climatiseurs) à des coûts marginaux négatifs. Les coûts d'inconfort sonore ne sont cependant pas intégrés dans les calculs et la méthode utilisée dans la partie 5.2.2.1 mène par exemple à des coûts négatifs dans le cas d'une rue résidentielle, mais à des coûts très élevés dans le cas d'une rue où la circulation est importante¹⁴⁶ (de l'ordre de 50 €/kWhep à Trappes). Des économies d'énergie à un tel coût ne sont alors plus justifiées.

¹⁴⁶ La monétisation retenue au chapitre 2 était de 156 €/personne/an.

5.3.3 Perspective d'évolution des résultats de l'ACB sociétale à l'horizon 2050

L'ACB sociétale, dont les résultats sont présentés pour l'année 2008 en partie 5.3.1, a été réalisée pour l'année 2050 en supposant un réchauffement du climat (voir le chapitre 3 concernant nos hypothèses de changement climatique) et une augmentation des prix des énergies (multiplié par un facteur 2 environ – voir la partie 5.1.2.3).

L'étude de l'influence du changement climatique et de l'augmentation du prix des énergies sur le bilan sociétale est menée dans deux directions. Dans un premier temps, nous comparerons les bilans économiques sociétaux des pièces climatisées et non climatisées afin de comprendre dans quelle mesure la climatisation pourrait devenir une prescription rationnelle dans un contexte de changement climatique. Dans un deuxième temps, nous confronterons les optimums sociétaux déterminés pour l'année 2050 aux optimums privés, ce qui nous permettra d'étudier les stratégies à adopter en prévision du phénomène de changement climatique et les conflits avec l'adaptation spontanée.

5.3.3.1. La climatisation, une prescription rationnelle dans un contexte de changement climatique ?

Secteur tertiaire

Dans le cas de la pièce de bureaux située à Trappes, le surcoût sociétal des meilleures solutions sans climatisation par rapport aux meilleures configurations climatisées est de l'ordre de 100 €/m². Ces premières sont même moins avantageuses (de 20 €/m²) que la simple mise en place du climatiseur de référence (d'efficacité saisonnière égale à 3). Le phénomène est bien évidemment amplifié pour les autres pièces de bureaux (Nice, rénovation). Les résultats obtenus avec nos hypothèses de réchauffement climatique et de hausse du prix des énergies aboutissent donc à la justification sociétale de la climatisation dans les bureaux, et ce, malgré les coûts externes dont elle est la source.

En ce qui concerne les boutiques, les solutions intégrant l'installation d'un climatiseur étaient déjà optimales du point de vue sociétal en 2008 et le restent en 2050.

Secteur résidentiel

La Figure 5.39 présente, dans le cas de la pièce d'appartement située à Nice, le positionnement des différentes actions étudiées en fonction des bénéfices (exprimés par unité de surface) pouvant être réalisés par rapport à la situation de référence, et des degrés-heures d'inconfort.

Les résultats représentés sur cette figure montrent que la possibilité de recourir à la ventilation naturelle nocturne est une condition nécessaire et suffisante pour que la climatisation ne soit pas justifiée du point de vue sociétal.

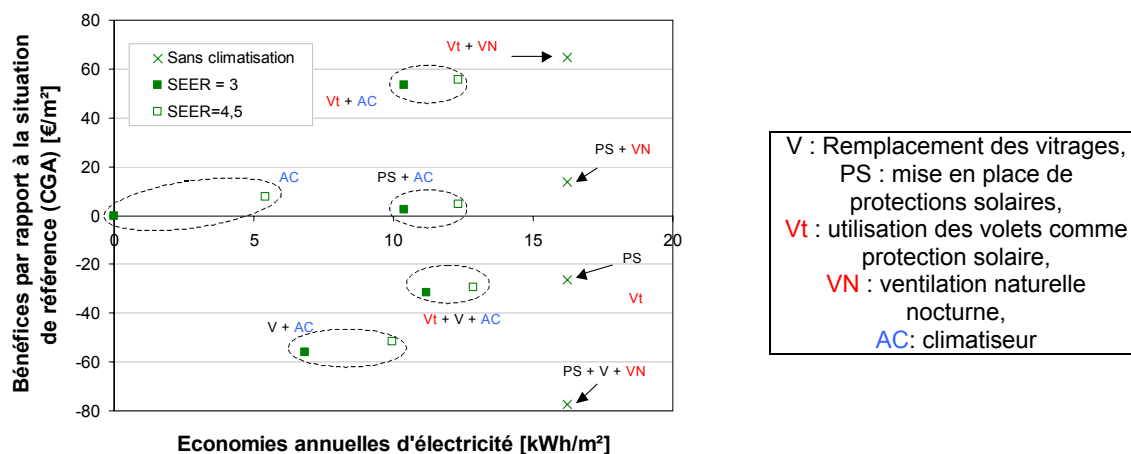


Figure 5.39. Bénéfices engendrés par les différentes actions étudiées en fonction des économies d'électricité (liées à la climatisation) pour l'appartement situé à Nice en 2050

Le Tableau 5.27 présente les meilleures configurations du point de vue sociétal en fonction des moyens d'adaptation existants dans les pièces résidentielles. A part dans la pièce rénovée de Nice, la ventilation naturelle est une condition nécessaire et suffisante pour que la climatisation ne soit pas justifiée du point de vue sociétal.

Ce résultat est cependant à nuancer en raison, d'une part des incertitudes qui pèsent sur ce travail et d'autre part du fait que les solutions de ventilation naturelle nocturne peuvent voir leur bilan économique grandement impacté par des éléments que nous n'avons pas pris en compte (la pollution, les nuisances sonores, notamment en période de sommeil des occupants). Si l'on intègre les nuisances sonores d'après notre méthode de monétisation, alors la climatisation est justifiée dans toutes les configurations.

Tableau 5.27. Configurations dans lesquelles la climatisation est justifiée du point de vue sociétal en 2050.

	Trappes	Trappes (rénové)	Nice	Nice (rénové)
Protections solaires existantes + ventilation nocturne envisageable	Non justifiée	Non justifiée	Non justifiée	Justifiée
Ventilation nocturne envisageable	Non justifiée	Non justifiée	Non justifiée	Justifiée
Protections solaires existantes	Justifiée	Justifiée	Justifiée	Justifiée
Ni protection, ni ventilation	Justifiée	Justifiée	Justifiée	Justifiée

5.3.3.2. Adaptation spontanée et optimums sociétaux en 2050

Le Tableau 5.28 regroupe les optimums privé et sociétal dans le cas des pièces de bureaux en 2050. Un effort supplémentaire est justifié sur l'enveloppe des bâtiments puisque le remplacement anticipé des vitrages à faible facteur solaire fait maintenant partie des configurations optimales, tout comme l'installation d'un système de ventilation mécanique dans le cas de la pièce rénovée à Nice,. Concernant les équipements, les efficacités requises sont fortement augmentées à Nice mais pas à Trappes.

Tableau 5.28. Optimums privés et sociétaux dans le cas des pièces de bureaux en 2050

	Privé (remplacement anticipé des vitrages)	Privé (remplacement programmé des vitrages)	Sociétal
Trappes	E + AC(4,5)	V + E + AC(4,5)	V + E + AC(4,5)
Trappes - rénové	E + AC(4,5)	V + E + AC(4,5)	V + E + AC(4,6)
Nice	E + AC(5,2)	V + E + AC(4,5)	V + E + AC(6,5)
Nice - rénové	E + AC(6,5)	V + E + AC(5,2)	E + V + VM + AC(6,5)

La Figure 5.40 présente une comparaison des consommations unitaires de référence et des consommations correspondant aux optimums économiques privés et sociétal. La situation de référence consiste en l'installation d'un climatiseur d'efficacité saisonnière égale à 3 (valeur moyenne sur le marché actuel d'après les résultats du chapitre 4). Dans le cas des bureaux, adopter la configuration optimale d'un point de vue sociétal permet de réduire la consommation de climatisation de l'ordre de 70 à 85 % par rapport à la référence.

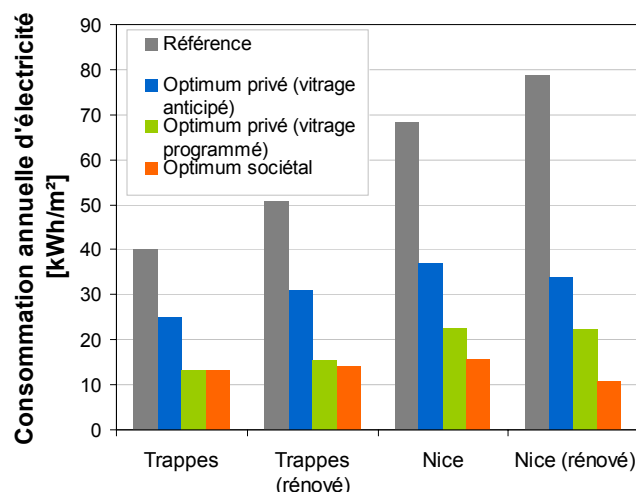


Figure 5.40. Comparaison des consommations unitaires de référence et des consommations correspondant aux optimums privés et sociétaux dans le cas des pièces de bureaux en 2050

Le Tableau 5.29 regroupe les optimums privé et sociétal dans le cas des boutiques. Les résultats obtenus montrent une synergie entre les deux points de vue puisque l'unique différence réside dans l'augmentation de l'efficacité saisonnière des appareils dans le cas de Nice. Ceci permet de réduire les consommations unitaires (voir Figure 5.22) de 7 % et 15 % par rapport aux niveaux atteints avec les solutions optimales d'un point de vue privé.

Tableau 5.29. Optimums privés et sociétaux dans le cas des boutiques en 2050

	Privé	Sociétal
Trappes	E + PS + AC(4,5)	E + PS + AC(4,5)
Trappes - renové	E + PS + AC(4,5)	E + PS + AC(4,5)
Nice	E + PS + AC(4,5)	E + PS + AC(4,9)
Nice - renové	E + PS + AC(4,5)	E + PS + AC(5,2)

Le Tableau 5.30 regroupe les optimums privé et sociétal dans le cas des pièces de résidence. Si les protections solaires n'étaient pas justifiées selon l'optimum privé, elles le sont d'un point de vue optimal. D'autre part, les efficacités requises sont maintenant plus élevées à Trappes d'environ 30 %.

Tableau 5.30. Optimums privés et sociétaux dans le cas des pièces de résidence climatisées

	Protections solaires existantes		Sans protections solaires existantes	
	Privé	Sociétal	Privé	Sociétal
Trappes	Vt + AC(3)	Vt + AC(4,2)	AC(3,2)	PS + AC(4,2)
Trappes – renové	Vt + AC(3,2)	Vt + AC(4,2)	AC(4,2)	PS + AC(4,2)
Nice	Vt + AC(4,2)	Vt + AC(4,5)	AC(4,5)	PS + AC(4,5)
Nice – renové	Vt + AC(4,5)	Vt + AC(4,5)	AC(4,5)	PS + AC(4,5)

La Figure 5.41 présente une comparaison des consommations unitaires de référence et des consommations correspondant aux optimums économiques privés et sociétal. Les optimums sociétaux correspondent à une réduction de l'ordre de 80 % des consommations.

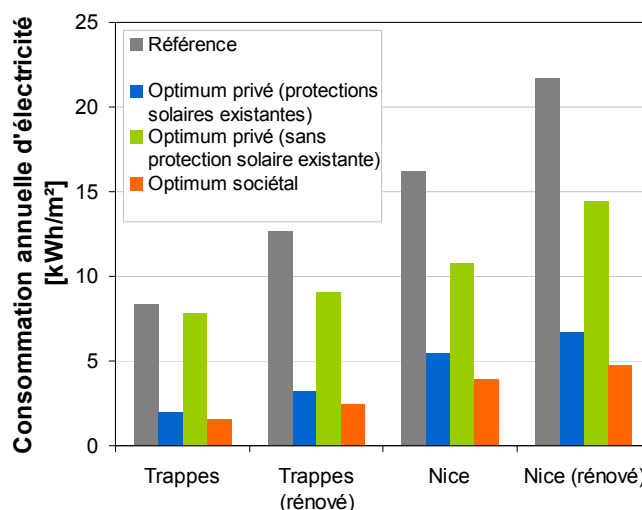


Figure 5.41. Comparaison des consommations unitaires de référence et des consommations correspondant aux optimums privés et sociétaux dans le cas des pièces de résidence

Selon nos résultats, dans un contexte de changement climatique, il ne sera pas optimal du point de vue de la société d'améliorer le confort d'été des bâtiments sans recourir à la climatisation, excepté dans le cas des pièces résidentielles où la ventilation nocturne sera envisageable.

Dès lors, des solutions permettant de diminuer l'impact de la climatisation devront être mises en place.

Dans un premier temps, se rapprocher de l'optimum privé en luttant contre les dysfonctionnements et la rationalité limitée des agents privés, permet des économies conséquentes par rapport à une adaptation spontanée consistant à acheter un climatiseur dans la moyenne du marché (partie 5.2.4.4).

Dans un second temps, il s'agira de mettre en place des instruments pour se rapprocher des optimums sociétaux. Si ces derniers sont assez proches des optimums privés dans le secteur tertiaire, l'adoption du point de vue privé dans le secteur résidentiel pourrait mener à une généralisation des appareils sans mesures d'enveloppe, alors que la prise en compte du point de vue sociétal incite à jouer à la fois sur les équipements et sur l'enveloppe.

5.4 Eléments de prospective quant aux consommations énergétiques et aux émissions de GES liées à la climatisation individuelle en France

L'objectif de cette partie est de réaliser un travail prospectif afin d'estimer l'impact que pourrait avoir la climatisation individuelle sur les consommations d'énergie et les émissions de GES en France.

Dans un premier temps, cet exercice de prospective requiert de définir une situation de référence relative à l'évolution des consommations de climatisation individuelle. Nous nous intéresserons ensuite aux potentiels d'économies d'énergie existants puis aux possibilités de réduction des émissions de GES.

5.4.1 Détermination d'un scénario tendanciel pour la France

5.4.1.1. Description générale de la démarche

Notre objectif est ici d'établir des estimations des consommations annuelles d'énergie liées à la climatisation individuelle en 2005, 2030 et 2050, avec et sans réchauffement climatique. Pour ce faire, nous adoptons une approche ascendante consistant à estimer l'évolution des surfaces climatisées, puis à calculer les consommations nationales de climatisation individuelle grâce aux besoins unitaires des pièces représentatives (définies au chapitre 3) et à des hypothèses concernant l'efficacité saisonnière moyenne du parc de climatiseurs. Pour rappel, nous ne nous intéressons qu'au parc existant, que nous définissons comme l'ensemble des bâtiments construits avant 2005.

5.4.1.2. Surfaces par secteur en fonction des zones climatiques

L'évolution de la pénétration de la climatisation varie fortement selon les climats et les types de bâtiments (tertiaire, résidentiel). Nous avons donc choisi de partager la France en différentes zones climatiques et de diviser le parc de bâtiment en trois catégories que sont celles utilisées au cours de cette thèse (bureaux, résidence, boutique).

Zones climatiques

Comme nous l'avons vu au chapitre 3, les climats de Trappes et Nice représentent des situations extrêmes en termes de « sévérité » de la saison d'été.

Nous avons choisi de rajouter deux climats, Bordeaux et Mâcon, afin d'améliorer la prise en compte de la diversité des climats français. D'autre part, il nous est possible pour ces deux nouveaux climats de déterminer leur évolution en 2050 dans l'hypothèse d'un changement climatique (suivant la méthode présentée au chapitre 3).

La répartition s'est basée, de façon relativement arbitraire, sur les frontières des régions françaises.

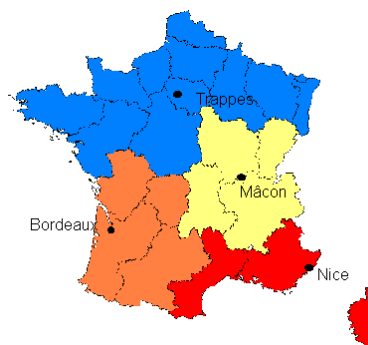


Figure 5.42. Zones climatiques retenues pour l'étude prospective du développement de la climatisation individuelle

Surface par secteur et par zone climatique

Une estimation des surfaces couvertes par type de bâtiment et par zone climatique est nécessaire pour permettre de calculer l'étendue des surfaces climatisées à partir des taux de pénétration de la climatisation, une opération qui s'avérera nécessaire par la suite.

En France, le secteur résidentiel se déploie sur 2,3 milliards de m² selon l'INSEE¹⁴⁷ et la surface totale de bureaux chauffés était de 189 158 000 m² en 2006 (ADEME, 2007). En ce qui concerne le secteur commercial, une analyse des données fournies par l'INSEE (2004) montre que les commerces de moins de 150 m² (qui sont les plus susceptibles d'être équipés d'appareils de climatisation individuelle) représentent environ 25 % de la surface commerciale de détail française, soit 16,7 millions de m².

Afin de répartir ces surfaces par zone climatique, nous les avons pondérées en fonction du nombre de personnes habitant ces différentes zones (RF, 2009), ce qui nous permet d'obtenir les résultats donnés dans le Tableau 5.31¹⁴⁸.

Tableau 5.31. Surfaces par secteur et par zone climatique en millions de m²

	Résidence	Bureaux	Boutiques
Nord	1204	108	10
Sud-ouest	287	26	2
Centre-est	347	31	3
Méd.	262	24	2

5.4.1.3. Le parc climatisé actuel

Estimation de la surface climatisée actuelle

Dans le but d'estimer l'étendue des surfaces actuellement climatisées par des appareils individuels, nous évaluons tout d'abord le stock de climatiseurs installés en termes de puissance frigorifique puis le divisons par les valeurs de dimensionnement déterminées au chapitre 3 pour nos pièces de référence.

Sur la base du nombre d'unités vendues entre 1980 et 2005, le BRE (British Research Establishment) a calculé le stock de climatiseurs actuellement installés en France (Rivière et al., 2009) que nous pouvons traduire en puissances frigorifiques, sachant que celle des produits vendus est en moyenne de 3,5 kW (chapitre 4). Selon ces calculs, le stock installé en France en 2005 s'élève alors à **15 506 MW de puissance frigorifique**.

Afin d'estimer la répartition du stock par zone climatique, nous nous reposons sur les chiffres de vente donnés pour l'année 1999 par le journal Bâtiment Relations Elec (2000) et aboutissons aux résultats présentés dans le Tableau 5.32 qui révèlent la prépondérance des zones « Méditerranée » et « Nord » avec chacune 30 % du stock. Il faut être conscient que cette répartition du stock est fortement empreinte d'incertitudes car nous considérons notamment que l'image des ventes à un moment donné est représentative de la répartition du stock, et que la répartition par unité est proportionnelle à la répartition en fonction de la puissance frigorifique. D'autre part les régions utilisées par Bâtiment Relations Elec (2000) sont différentes des celles adoptées dans cette étude.

Tableau 5.32. Détermination des coefficients de répartition du stock par région climatique

Répartition des ventes de climatiseurs (Bâtiment Relations Elec, 2000)		Répartition du stock de climatiseurs individuels			
		Nord	Sud-ouest	Centre-est	Méd.
Méditerranée	31 %	-	-	-	31 %
Ile de France	18 %	18 %	-	-	-
Sud-ouest	16 %	-	16 %	-	-
Nord/Centre/Ouest	13 %	7 %	6 %	-	-
Rhône Alpes	11 %	-	-	11 %	-
Est	11 %	6 %	-	5 %	-
Total		31 %	22 %	16 %	31 %

¹⁴⁷ Valeur déduite des surfaces moyennes par personne fournies sur le site de l'Insee (www.insee.fr, Quelques caractéristiques du parc de résidences principales) et des chiffres de la population française (RF, 2007).

¹⁴⁸ En adoptant cette répartition des surfaces nationales, nous passons outre le fait que le ratio surface par habitant est plus faible en ville et que les surfaces de bureaux ne sont pas directement corrélées à la population.

En ce qui concerne la répartition entre les différents types de bâtiment, nous nous reposons sur l'examen des enquêtes Batim-étude en 1997 et 2003 (Adnot et *al.*, 2002) pour estimer la part des secteurs résidentiel et tertiaire dans le stock de climatiseurs individuels (Tableau 5.33). Le stock attribué au secteur tertiaire est ensuite réparti entre les bureaux et les boutiques au prorata des surfaces (Tableau 5.31).

Tableau 5.33. Répartition du parc entre secteurs résidentiel et tertiaire

	Résidentiel	Tertiaire
Ile de France	10 %	90 %
Sud ouest	35 %	65 %
Rhône Alpe	25 %	75 %
Méd.	55 %	45 %

Au final, toutes les hypothèses que nous venons de décrire permettent d'aboutir à une répartition en fonction du climat et du secteur présentée dans le Tableau 5.34.

Tableau 5.34. Répartition du stock de climatiseurs individuels par zone et par secteur

	Résidence	Bureaux	Boutiques	Total
Nord	3 %	25 %	3 %	31 %
Sud-ouest	8 %	13 %	1 %	22 %
Centre-est	4 %	11 %	1 %	16 %
Méd.	17 %	13 %	1 %	31 %
Total	32 %	62 %	6 %	

Enfin, connaissant cette dernière répartition et le stock total installé en France (exprimé en puissance frigorifique), nous obtenons la puissance totale de refroidissement par zone et par secteur et il ne reste plus qu'à connaître les puissances de dimensionnement pour obtenir les surfaces climatisées. Ces dernières sont obtenues à partir des résultats de simulations du chapitre 3 et des hypothèses de dimensionnement décrites au chapitre 4 (Tableau 4.10). Pour rappel, nous avons alors supposé 30 % de surdimensionnement mais il existe une très grande incertitude concernant les pratiques *in-situ*.

Tableau 5.35. Puissances de dimensionnement retenues en W/m²

	Résidence	Bureaux	Boutiques
Nord	170	180	170
Sud-ouest	180	200	180
Centre-est	180	200	180
Méd.	180	200	180

L'étendue des surfaces actuellement climatisées est rassemblée dans le Tableau 5.36. Ces dernières couvrent, selon nos calculs, environ 83 millions de m² en 2005 dont 45 % environ dans les bureaux de la zone « Nord » et dans les résidences de la zone « Méditerranée ».

Tableau 5.36. Surfaces climatisées en millions de m²

	Résidence	Bureaux	Boutiques
Nord	2,8	21,8	2,4
Sud-ouest	6,6	10,0	1,2
Centre-est	3,4	8,4	1,0
Méd.	14,7	9,8	1,1
Total	27,6	50,0	5,7

L'étude EECCAC (Energy Efficiency and Certification of Central Air Conditioners), menée par Adnot et *al.* (2002), avait abouti à une prévision de la surface climatisée (par des climatiseurs individuels) de 75 millions de m² en 2005, un résultat 10 % moins élevé que celui obtenu ici. Les prévisions de l'étude EECCAC n'intégrant pas l'explosion des ventes et des installations liées à la canicule de 2003

(augmentation des ventes de 250 % entre 2000 et 2004), nos résultats semblent en accord avec ceux de cette étude, notamment au vue des incertitudes importantes dont les deux exercices sont empreints.

Estimation du taux de pénétration actuel de la climatisation individuelle

En divisant ces surfaces climatisées par les surfaces totales estimées au début de cette partie, nous obtenons les taux de pénétration de la climatisation individuelle (Tableau 5.37). A l'échelle nationale, ce taux de pénétration est évalué à 1,3 % dans le secteur résidentiel, à 26 % dans les bureaux et à 34 % dans les boutiques. Cependant, la climatisation individuelle n'est pas le seul moyen de refroidissement utilisé dans ces deux derniers secteurs et les taux de pénétration y sont donc plus élevés.

Tableau 5.37. Taux de pénétration pour les différentes zones et différents secteurs (% de surface climatisée par rapport à la surface totale)

	Résidence	Bureaux	Boutiques
Nord	0,2	20,1	25,2
Sud-ouest	2,1	38,8	51,3
Centre-est	0,9	27,0	35,6
Méd.	5,1	41,4	54,7
France	1,2	26,4	34,2

Dans le secteur résidentiel, le taux de pénétration maximum est de 5 % à Nice mais il est vraisemblablement plus élevé si l'on raisonne en nombre de logements climatisés (totalement ou partiellement). En effet, si l'on suppose que toutes les habitations climatisées ne sont en fait équipées que pour une seule pièce¹⁴⁹, alors le taux de pénétration augmente fortement (Tableau 5.38). Ainsi, le taux de pénétration, défini comme le nombre de logements partiellement ou totalement climatisés par rapport au nombre total de logements, est compris entre 5 et 21 % en zone « Méditerranée » et entre 1 et 5 % sur l'ensemble de la France. Cette dernière estimation du taux de pénétration est en accord avec celle de l'entreprise RTE (Réseaux de Transport d'Electricité) selon laquelle 3 % des ménages français sont équipés de climatiseurs individuels (ONERC, 2009).

Tableau 5.38. Taux de pénétration (%) en supposant une seule pièce climatisée par logement

	Résidence
Nord	0,9
Sud-ouest	8,7
Centre-est	3,8
Méd.	21,1
France	5,0

5.4.1.4. Evolution de l'étendue des surfaces climatisées

Estimation des taux de saturation

A notre connaissance, la seule étude portant sur la pénétration de la climatisation dans des marchés matures est celle menée par Sailor et Pavlova (2003). En se basant sur l'analyse de la situation dans 39 villes des Etats-Unis, cette étude consiste à relier le taux de saturation dans le secteur résidentiel au climat, et plus particulièrement aux degrés-jours de refroidissement (Figure 5.43).

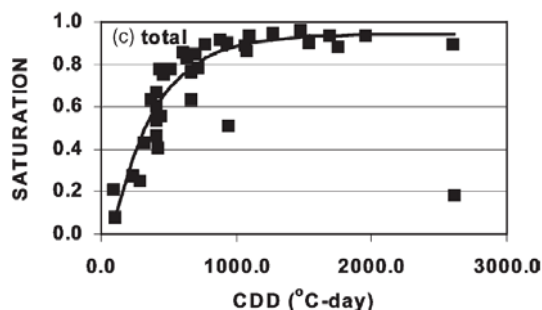


Figure 5.43. Taux de saturation dans le secteur résidentiel en fonction des degrés jours de refroidissement (Sailor et Pavlova, 2003)

¹⁴⁹ Selon l'INSEE, la surface moyenne des logements français est de 90 m² et celle des pièces de 22 m².

La relation obtenue par Sailor et Pavlova (2003) entre taux de saturation et degrés jours de refroidissement a ensuite été améliorée par MacNeil et Letschert (2007) qui ont abouti à l'équation (5.5).

$$S = 1 - 0,949 \cdot e^{-0,00187 \cdot CDD} \quad (5.5)$$

Avec : CDD, les degrés jours de refroidissement calculés avec l'équation (5.6),
S, le taux de saturation.

$$CDD = \sum_{i=1}^{365} \left(\frac{T_{max}^i + T_{min}^i}{2} - 18 \right)^+ \quad (5.6)$$

Avec : T_{max} et T_{min} les températures maximales et minimales journalières

La pénétration des climatiseurs dans une région géographique donnée dépend des conditions climatiques mais aussi de facteurs culturels (exigences de confort...) et économiques (pouvoir d'achat des ménages...). Dans le cas du secteur résidentiel, nous supposons cependant que le développement de la climatisation en France est semblable à ce qu'ont connu les Etats-Unis. Les taux de saturation peuvent alors être calculés à l'aide de l'équation (5.5) pour les climats actuels et dans l'hypothèse d'un changement climatique tel que défini au chapitre 3 (Tableau 5.39). Etant donné que la climatisation centralisée est très développée aux Etats-Unis, nous supposons que ces taux de pénétration correspondent aux ratios entre les surface climatisées et les surfaces totales (et non les logements climatisés, même partiellement, par rapport au nombre total de logements).

Tableau 5.39. Taux de saturation selon les climats dans le cas d'un développement états-unien de la climatisation résidentielle

	Climat actuel		Climat 2050	
	CDD (18 °C)	Saturation [%]	CDD (18 °C)	Saturation [%]
Trappes	92	20	424	57
Mâcon	159	30	710	75
Bordeaux	205	35	639	71
Nice	431	58	894	82

En ce qui concerne le secteur tertiaire, nous nous reposons sur l'étude ECCAC (Adnot et *al.*, 2002) qui, après analyse du contexte états-unien, avait abouti à des taux de saturation de 66 % pour la France et de 83 % pour l'Europe du sud dans le cas des bureaux, et de 60 et 70 % dans le cas des commerces. Les taux de saturation retenus sont regroupés dans le Tableau 5.40, ils supposent notamment que la part de la climatisation individuelle dans les bureaux sera égale à celle de la climatisation centralisée et que la climatisation non individuelle n'est que marginalement utilisée dans les boutiques (pour rappel, nous nous sommes concentrés sur les commerces de petites surfaces).

Tableau 5.40. Taux de saturation retenus pour le secteur tertiaire [%]

	Climat actuel		Climat 2050	
	Bureaux	Commerces	Bureaux	Commerces
Nord	30	60	40	80
Centre-est	30	60	40	80
Sud-ouest	40	70	50	100
Méd.	40	70	50	100

Vitesse de pénétration

Dans le cas du scénario de référence, nous supposons que les taux de saturation ci-dessus sont atteints en 2030. Ceci correspondrait à un accroissement annuel des ventes de l'ordre de 20 % d'ici 2030, ce qui n'est pas aberrant au vu des augmentations entrevues ces dernières années (plus de 25 % par an entre 2000 et 2004 - voir chapitre 1). Dans l'hypothèse d'un changement climatique, nous supposons que les taux de saturation sont atteints en 2050.

Evolution dynamique du parc

Dans cette étude, nous nous focalisons sur le parc bâti existant et il nous faut donc tenir compte la réduction de surfaces liées au renouvellement de ce parc. Pour le tertiaire et le résidentiel, nous faisons l'hypothèse d'un taux de sortie (démolition) de 0,3 %/an (Axenne, 2007). La prise en compte de la réhabilitation des bâtiments est abordée en partie 5.4.1.5.

Evolution des surfaces climatisées dans le parc existant

Selon nos calculs, l'étendue des surfaces climatisées s'élèverait à 620 millions de m² en 2030, soit une augmentation d'un facteur 7,5 par rapport à 2005. La répartition des surfaces climatisées entre les différentes zones et les différents secteurs est présentée dans le Tableau 5.41. La plus forte augmentation serait à mettre au compte du secteur résidentiel avec une augmentation d'un facteur 19 entre 2008 et 2030.

Tableau 5.41. Estimation des surfaces climatisées en 2030 (millions de m²)

	2005			2030		
	Résidence	Bureaux	Boutiques	Résidence	Bureaux	Boutiques
Nord	2,8	21,8	2,4	223,9	30,1	5,3
Sud-ouest	6,6	10,0	1,2	93,4	9,7	1,5
Centre-est	3,4	8,4	1,0	96,8	8,6	1,5
Méd.	14,7	9,8	1,1	141,3	8,9	1,4

Dans l'hypothèse d'un changement climatique, environ 1270 millions de m² seraient climatisés en 2050. Le secteur résidentiel représenterait alors plus de 90 % de la surface climatisée et la zone « Nord », 47 % à elle seule (contre environ 3 % en 2008).

Tableau 5.42. Estimation des surfaces climatisées en 2050 dans l'hypothèse d'un changement climatique (millions de m²)

	2050		
	Résidence	Bureaux	Boutiques
Nord	597,1	37,6	6,7
Sud-ouest	187,3	11,3	2,0
Centre-est	214,3	10,8	1,9
Méd.	186,9	10,4	1,8

Les projections de l'évolution des surfaces climatisées dans le parc bâti existant sont représentées sur la Figure 5.44. Dans l'hypothèse sans changement climatique, il est supposé que l'on atteint le taux de saturation en 2030 et qu'ensuite la surface climatisée diminue du fait de la réduction du parc existant.

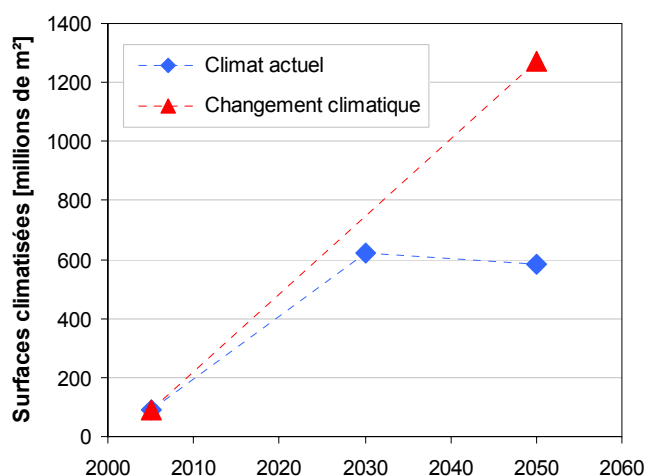


Figure 5.44. Projection de l'évolution des surfaces climatisées dans le parc bâti existant

5.4.1.5. Evolution des consommations liées à la climatisation

Afin d'estimer les consommations nationales liées à la climatisation individuelle, nous supposons que les technologies sont gelées au niveau actuel et que l'efficacité saisonnière moyenne du stock reste égale à 3. Nous sous-évaluons alors les consommations pour 2005, année à laquelle l'efficacité du stock est vraisemblablement inférieure à 3 car cette valeur correspond à l'efficacité moyenne des climatiseurs vendus en 2005 (voir chapitre 4).

Concernant les besoins de refroidissement, nous nous reposons sur ceux des pièces de référence définies au chapitre 3. Cependant, nous supposons qu'en 2030 et 2050, l'éclairage aura été totalement remplacé, ce qui implique une réduction des besoins de refroidissement (voir chapitre 3).

D'autre part, nous prenons en compte les conséquences des rénovations orientées chauffage sur les besoins de refroidissement à l'aide des simulations effectuées au chapitre 3 (partie 3.3). Nous considérons qu'aucun bâtiment n'a été rénové en 2005 mais que le parc bâti l'est ensuite à un rythme de 2,5 % par an (Axenne, 2007).

Enfin, les besoins de refroidissement des pièces situées dans les climats que nous n'avons pas étudiés au chapitre 3 (Bordeaux et Mâcon) sont calculés au prorata des degrés-jours de refroidissement (Tableau 5.39).

En définitive, nous aboutissons à une consommation d'électricité annuelle en 2005 de **2 TWh**, soit environ 0,4 % de la demande nationale cette même année. La majorité de cette consommation est liée aux pièces de bureaux (83 %).

La Figure 5.45 présente les projections obtenues en matière de consommations d'électricité. Avec nos hypothèses de pénétration et dans le cas d'un climat non perturbé, la consommation d'électricité augmenterait d'un facteur 4,5 d'ici 2030, atteignant 7,7 TWh dont 70 % pour la climatisation résidentielle. Dans l'hypothèse d'un réchauffement climatique, les consommations d'électricité seraient multipliées d'un facteur 12 entre 2005 et 2050.

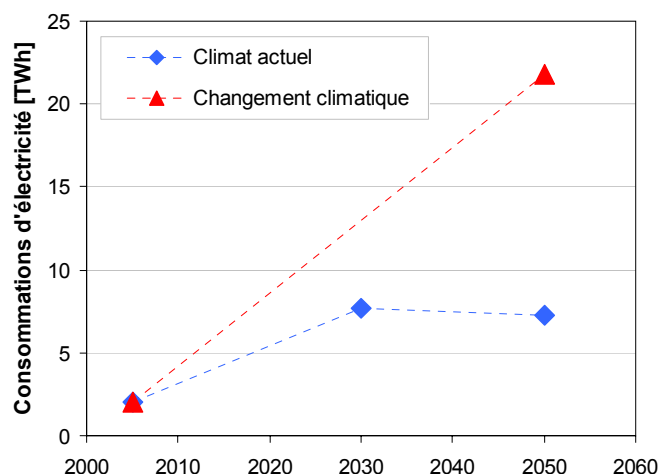


Figure 5.45. Projection des consommations annuelles d'électricité dues à la climatisation individuelle

A titre indicatif, la puissance électrique installée peut être estimée sommairement. En supposant un EER moyen égal à 3, la puissance électrique installée passe de 3,5 GW en 2005 à 25,7 GW en 2030. En 2008, la puissance maximale appelée pendant l'été était d'environ 60 GW en juillet et 57 GW en août contre 84,5 GW en décembre. L'augmentation d'une vingtaine de GW n'est donc pas anodine, elle positionnerait la pointe d'été au même niveau que celle d'hivers (RTE, 2008) et nécessiterait de repenser la gestion des moyens de production (maintenance, installation de nouvelles capacités de production...).

5.4.2 Potentiel de réduction des consommations à l'échelle du territoire

Nous avons vu dans la partie précédente qu'un développement spontané de la climatisation à l'image des Etats-Unis entraînerait une forte augmentation des consommations électriques en France. L'objet est ici d'évaluer dans quelle mesure les actions que nous avons étudiées à l'échelle du bâtiment dans les parties 5.2 et 5.3 permettent une réduction significative de ces consommations. Les volumes d'économies ne doivent pas être considérés comme des prévisions mais plutôt comme ce qui est en pratique réalisable aux horizons 2030 et 2050. Enfin, les coûts mentionnés par la suite sont évalués sans taxes, avec un taux d'actualisation de 4 % (point de vue sociétal mais sans coûts externes) et sont exprimés en monnaie constante (€₂₀₀₈).

5.4.2.1. Scénarios d'accompagnement du développement de la climatisation individuelle

Mesures mises en place à horizon 2030

Nous supposons ici que la demande de climatisation n'est pas modifiée, mais que les consommations sont réduites grâce à la mise en place de solutions définies comme optimales du point de vue sociétal, voire du point de vue privé.

Nous considérons que l'efficacité saisonnière moyenne du stock de climatiseur en 2030 est égale à 4,5. Ce niveau d'efficacité n'est pas optimal pour le secteur résidentiel mais nous avons vu que le surcoût engendré pour les ménages restait cependant très faible (partie 5.2.3).

D'autre part, nous supposons que l'ensemble des surfaces vitrées des pièces de bureaux climatisées a été remplacé par des vitrages à faible facteur solaire. La durée de vie supposée des vitrages étant de 30 ans, nous nous reposons sur l'hypothèse d'un taux de renouvellement de 3,3 % par an à partir de 2005, le reste des surfaces vitrées (8 % en 2030) est supposé avoir été remplacé de façon anticipée.

Pour les commerces, nous supposons l'installation généralisée de protections solaires, une configuration qui correspondait à l'optimum privé pour le climat de Nice et à l'optimum sociétal pour celui de Trappes.

Enfin, nous considérons que tous les logements sont équipés de protections solaires extérieures utilisées efficacement par les occupants¹⁵⁰.

Estimation des consommations d'électricité à horizon 2030

La mise en place des mesures décrite ci-dessus permettrait de réduire d'un facteur 2 environ la consommation d'électricité liée à la climatisation individuelle dans le secteur tertiaire (Tableau 5.43).

Tableau 5.43. Consommation d'électricité liée à la climatisation individuelle dans le secteur tertiaire

	2008	2030 (référence)	2030 (mesures de MDE)
Consommation annuelle d'électricité [TWh]	1,8	2,35	1,1

Le Tableau 5.44 présente les résultats obtenus pour le secteur résidentiel. Il est possible de réduire de plus de 60 % la consommation d'électricité liée à la climatisation individuelle en généralisant les protections extérieures. L'amélioration de l'efficacité saisonnière moyenne du stock de climatiseurs permettrait quant à elle d'économiser annuellement 0,65 TWh supplémentaires.

Les comportements apparaissent essentiels dans l'objectif de réduction des consommations de climatisation dans le secteur résidentiel. En effet, si seulement la moitié des ménages gère ces

¹⁵⁰ Elles sont baissées lors des périodes d'inoccupation en été. Voir l'algorithme de contrôle au chapitre 3.

protections solaires de façon optimale, alors la consommation annuelle n'est plus de 1,35 TWh mais de 2,4 TWh.

Il est donc fondamental de travailler à une évolution des comportements, notamment *via* des campagnes de sensibilisation. Il apparaît difficile de se reposer uniquement sur le facteur coût pour inciter les gens à recourir à une utilisation optimale des protections solaires dans les pièces climatisées. En effet, cela ne permet qu'une réduction très modeste de la facture d'électricité, de l'ordre de 7 à 15 € par an et par pièce¹⁵¹ (Trappes et Nice) en 2008 et de 10 à 20 € en 2030. A titre d'exemple, ces valeurs représentent environ 0,5 – 1 % de la facture d'énergie actuelle d'un ménage francilien (1260 € sans tenir compte du transport selon Mettetal (2009)).

Tableau 5.44. Consommation d'électricité liée à la climatisation individuelle dans le secteur résidentiel

	Consommation annuelle d'électricité [TWh]
2008	0,2
2030 (référence)	5,35
2030 (généralisation des protections)	2
2030 (généralisation des protections + efficacité du stock égale à 4,5)	1,35

Au final, la consommation d'électricité, secteurs résidentiel et tertiaire confondus, est réduite à 2,45 TWh, contre 7,7 TWh dans le scénario de référence. Les travaux de monétisation réalisés dans les parties 5.2 et 5.3 peuvent être repris ici afin d'obtenir le coût de cette réduction. L'application des mesures précédemment décrites dans le secteur tertiaire engendre une économie de 1,25 TWh/an à un coût marginal inférieur à - 1,4 €/kWh. Dans le secteur résidentiel, l'utilisation optimale des protections solaires et l'amélioration de l'efficacité saisonnière moyenne du stock de climatiseurs permettent des économies respectivement égales à 3,35 TWh/an et 0,65 TWh/an, pour des coûts marginaux inférieurs à - 16 €/kWh et 4 €/kWh.

De façon générale, les mesures présentées engendreraient une réduction des consommations d'électricité de 5,25 TWh/an à horizon 2030 à un coût moyen de l'ordre de - 10 €/kWh.

Horizon 2050

La Figure 5.46 présente les projections de consommations d'électricité à horizon 2050 dans le cas du scénario de référence, avec et sans changement climatique, et dans le cas de la mise en place des mesures décrites précédemment.

Il est possible de réduire d'un facteur 5 environ les consommations annuelles d'électricité qui atteindraient alors 4,5 TWh.

La mise en place de mesures supplémentaires s'effectuera à des coûts positifs. Cependant, il est possible de réduire encore un peu plus les consommations à un coût moyen inférieur au prix de l'électricité (20 €/kWh en 2050) en visant une efficacité saisonnière moyenne du parc de climatiseurs égale à 5,5. Les consommations annuelles atteignent alors 3,7 TWh.

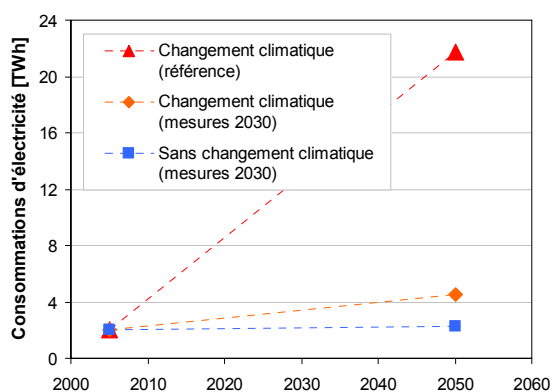


Figure 5.46. Projection des consommations annuelles d'électricité dues à la climatisation individuelle

¹⁵¹ Selon l'INSEE, la surface moyenne des pièces françaises est de 22 m².

5.4.2.2. Infléchir le développement de la climatisation

Dans la partie précédente, nous avons considéré un développement de la climatisation similaire à la situation qu'ont connu les Etats-Unis. Réduire la pénétration de la climatisation individuelle dans le parc bâti engendre bien évidemment des économies d'énergie par rapport au scénario de référence.

Nous avons étudié un scénario de développement extrême et il n'existe aucune base sur laquelle se reposer pour définir un autre scénario qui tiendrait alors de la simple supposition. Nous préférons présenter la répartition des consommations en 2030 et 2050, une fois que les mesures précédemment décrites ont été mises en place (Figure 5.47a) et b)).

Ces figures montrent que la part des résidences et des bureaux situés dans la zone « Nord » est importante (26 % en 2030). Or, nous avons vu dans la partie 5.3 qu'il existait des possibilités d'amélioration du confort, efficaces économiquement, qui ne nécessitaient pas de recourir à la climatisation individuelle. Pour peu que la ventilation naturelle nocturne soit envisageable, certaines actions peuvent même permettre d'éviter l'installation de climatiseurs dans les résidences situées au nord dans le cas d'un réchauffement du climat.

Si il est difficile de prévoir dans quelle mesure il est possible de réduire la pénétration de la climatisation dans les années à venir, la part importante des bâtiments situés en zone Nord permet d'entrevoir des possibilités d'économies d'énergie de ce côté là.

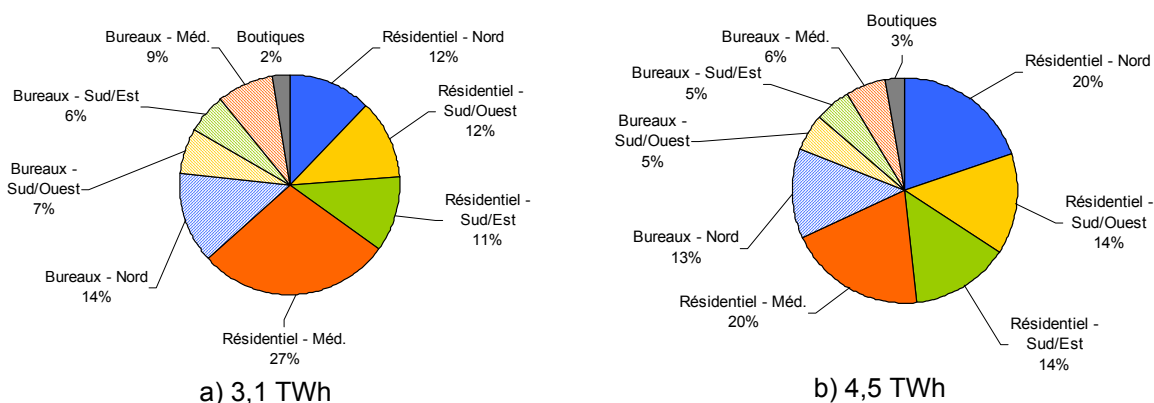


Figure 5.47. Répartition des consommations annuelles d'électricité liées à la climatisation individuelle en 2030 (a) et 2050 (b), une fois les mesures de MDE mises en place

5.4.2.3. Conclusions

Le développement de la climatisation individuelle à l'image des Etats-Unis pourrait entraîner des consommations électriques liées à cet usage de l'ordre de 8 TWh/an en 2030 et 20 TWh/an en 2050 avec nos hypothèses de changement climatique. Cependant, l'exercice de prospective présenté ici montre que l'adoption de mesures portant sur les appareils et sur l'enveloppe des bâtiments permettrait de réduire fortement les consommations, et ce, à des coûts souvent négatifs, et avec des technologies actuellement disponibles sur le marché. Le potentiel accessible de réduction des consommations a été estimé à 5 TWh/an en 2030 et 18 TWh/an en 2050.

Un point important sera le comportement des occupants dans le secteur résidentiel. En effet, c'est dans ce secteur que la climatisation individuelle se développera le plus fortement et des économies importantes peuvent y être obtenues à la fois en réduisant la pénétration des climatiseurs et en utilisant les protections solaires à bon escient.

Dans le cas du changement climatique, l'ONERC (2009) prévoit une réduction de 10 TWh/an d'électricité de chauffage (avec un scénario de réchauffement A2 similaire au nôtre). La mise en place des mesures que nous décrivons dans cette partie permettant de limiter à moins de 3 TWh/an l'augmentation des consommations de climatisation, le changement climatique serait alors « bénéfique » en termes de consommations électriques. Bien évidemment, sans ces mesures de réduction des consommations de climatisation, nous assistons alors à une augmentation globale des consommations électriques de l'ordre de 10 TWh/an.

5.4.3 La contribution du confort d'été dans les scénarios facteur 4

5.4.3.1. Hypothèses retenues

Dans le but d'évaluer les émissions de GES engendrées par l'usage des climatiseurs individuels, nous tenons compte des émissions directes (fuites de fluide réfrigérant) et indirectes (consommations d'électricité).

Pour les émissions directes, nous nous basons sur l'analyse du marché réalisée dans le cadre du chapitre 4 et supposons une quantité initiale de 300 g par kilowatt de puissance frigorifique, un taux de fuite annuel de 3 % et un taux de récupération de 95 % en fin de vie.

L'estimation du contenu carbone du kilowattheure électrique est difficile et prête généralement à débat, notamment pour les raisons suivantes (abordées au chapitre 3, partie 3.4.5) :

- variabilité du contenu au cours du temps liée aux différents modes de production utilisés en fonction de la demande,
- interconnexions des réseaux nationaux (le contenu carbone de la moyenne du mix européen est 370 g de CO_{2eq}, celui du mix français est inférieur à 75 g).

De plus, il est difficile de prévoir l'évolution du contenu carbone dans les années à venir. Dans notre cas il dépend de l'évolution des parcs de production français et européens ainsi que du développement de la climatisation. En cas de développement important de la climatisation, on assistera à une pointe d'été similaire à celle connue actuellement pour le chauffage électrique, usage pour lequel l'ADEME et RTE (2007) quantifie le contenu carbone à 180 g par kilowattheure consommé (la plage de variation est de 130 g – 260 g).

Pour la suite, nous retenons la valeur de 180 g par kilowattheure consommé qui est comprise entre les moyennes d'émissions des parcs français et européen et qui représente une conséquence envisageable de développement de l'usage de la climatisation en France.

5.4.3.2. Estimation des émissions de GES

Afin d'étudier la contribution de la climatisation aux émissions de GES, nous calculons les émissions nationales liées à cet usage pour les situations suivantes :

- 2005,
- scénario de référence en 2030,
- 2030 avec mise en place des actions précédemment décrites,
- scénario de référence en 2050 avec changement climatique,
- 2050 avec mise en place des actions précédemment décrites,
- 2050 avec mise en place des actions précédemment décrites mais sans changement climatique.

Les résultats sont présentés Figure 5.48 selon les trois postes d'émissions principaux : la consommation d'électricité, les fuites de fluide frigorigène pendant la phase d'usage et les fuites en fin de vie. Nous mentionnons également les fuites supplémentaires de GES qui pourraient survenir en cas d'une récupération limitée des fluides frigorigènes en France (taux de récupération de seulement 10 %).

Dans le scénario de référence, les émissions annuelles liées à la climatisation sont estimées à 0,5 Mt de CO_{2eq} en 2005, à 2,6 Mt en 2030 et à 7 Mt en 2050 (hypothèse d'un réchauffement climatique). Dans le cas de la non récupération des fluides frigorigènes en fin de vie, nous assistons alors à une forte augmentation des émissions, de l'ordre de 70 à 90 %.

La mise en place d'une filière de récupération et de traitement de fluides frigorigènes en fin de vie apparaît ici fondamentale. Selon notre scénario de référence, elle permettrait d'éviter annuellement 0,35 Mt de CO_{2eq} en 2005 et 2,6 Mt en 2030, à un coût d'environ 40 à 50 €/tCO_{2eq} (voir chapitre 4).

Ensuite, les mesures de maîtrise des consommations d'électricité donneraient lieu à une réduction des émissions directes et indirectes (car il y a réduction des puissances installées et donc des quantités de

fluides). En supposant que 95 % des fluides sont récupérés en fin de vie, ce sont respectivement 1,4 et 4,7 Mt de CO_{2-eq} qui peuvent être évitées annuellement en 2030 et 2050, à un coût de - 60 €/t en 2030 et - 700 €/t en 2050 (hypothèse d'un changement climatique).

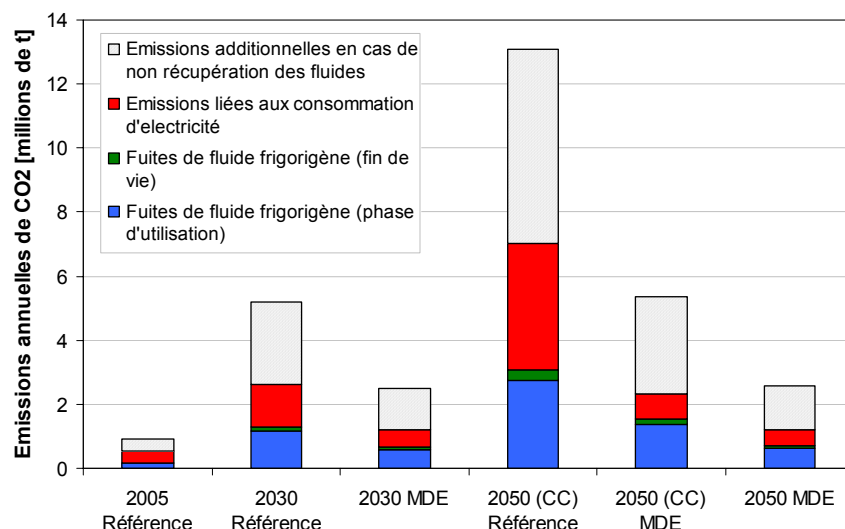


Figure 5.48. Projection des émissions annuelles de CO₂ pour différents scénarios (CC : changement climatique)

Dans une optique de réduction des émissions de GES à horizon 2050, la réduction des consommations d'électricité a permis de diviser d'un facteur 3 les émissions totales mais elle ne semble pas offrir de potentiel supplémentaire. En effet, obtenir un parc de climatiseurs dont l'efficacité moyenne saisonnière serait égale à 5,2 permettrait d'économiser encore 0,10 Mt de CO_{2-eq} mais à un coût très élevé, de l'ordre de 3900 €/t.

Une réduction supplémentaire des émissions passe donc par une réduction de l'impact des fluides notamment *via* l'utilisation de fluides naturels. En 2050, les fuites de fluide représentent en effet un poste d'émission plus important que les consommations d'électricité (Figure 5.48). Comme nous l'avons souligné au chapitre 4, en l'absence d'information sur les performances énergétiques et économiques de systèmes fonctionnant avec des fluides naturels, il ne nous a cependant pas été possible d'évaluer leur potentiel.

Enfin, selon nos résultats et avec nos hypothèses de changement climatique, les émissions annuelles de GES seront de l'ordre de 2,3 Mt de CO_{2-eq} soit environ 2 % du plafond à respecter en France pour atteindre le facteur 4.

5.5 Enseignements et recommandations tirés du présent chapitre

5.5.1 Résultats de l'analyse coût-bénéfice d'actions d'amélioration du confort d'été à l'échelle du bâtiment

5.5.1.1. La comparaison entre pièces climatisées et non climatisées

Les résultats de la comparaison économique entre pièces climatisées et non climatisées diffèrent selon que l'on adopte un point de vue sociétal ou privé. Du point de vue sociétal, le recours à la climatisation ne semble légitime que dans les boutiques où les moyens d'adaptation des occupants et de réduction de l'inconfort sans climatisation sont limités. En revanche, l'analyse du point de vue privé montre que la climatisation est généralement justifiée dans les bureaux.

Cependant, la prise en compte des coûts d'inconfort sonore, réalisée ici assez grossièrement, tend à modifier totalement cet état des faits, rendant la climatisation optimale socialement, même dans le secteur résidentiel.

Enfin, dans un contexte de changement climatique¹⁵² et d'augmentation du prix des énergies, nous avons vu que la climatisation deviendrait optimale d'un point de vue sociétal dans la quasi-totalité des configurations étudiées ici. Il apparaît donc nécessaire de se préparer à l'éventualité d'une généralisation de cet usage.

5.5.1.2. Les actions à favoriser du point de vue sociétal

Pièces de bureaux

En ce qui concerne les pièces de bureaux non climatisées¹⁵³, la maximisation des bénéfices pour la société s'obtient en remplaçant le système d'éclairage, en mettant en place des protections solaires et en installant des systèmes de ventilation mécanique nocturne.

Concernant les pièces climatisées, la maximisation des bénéfices sociétaux s'obtient en remplaçant le système d'éclairage, en mettant en place des vitrages à faible facteur solaire (même lorsque leur remplacement n'est pas programmé) et en installant des climatiseurs dont l'efficacité saisonnière est comprise entre 4,5 et 4,9 selon les configurations (enveloppe rénoverée, climat).

Boutique

Dans le cas des boutiques, l'optimum sociétal correspond au remplacement de l'éclairage, à la mise en place de protections solaires et à l'installation de climatiseurs plus efficaces que la moyenne du marché actuel. Les niveaux d'efficacité saisonnière optimaux sont en effet compris entre 3,2 et 4,5 selon les configurations (enveloppe rénoverée, climat).

Pièces résidentielles

Dans le secteur résidentiel, l'optimum sociétal correspond à l'installation de protections solaires et, lorsque c'est possible, au recours à la ventilation naturelle nocturne.

Lorsque la climatisation est nécessaire (nuisances sonores, exigences de confort élevées), les solutions optimales correspondent à l'utilisation des protections solaires lorsqu'elles sont déjà existantes et à l'utilisation de climatiseurs dont l'efficacité saisonnière est comprise entre 3 et 4,2 selon les configurations (enveloppe rénoverée, climat).

¹⁵² Les hypothèses adoptées sont décrites au chapitre 3.

¹⁵³ Tout au long du chapitre et de nouveau ici, nous supposons que l'ouverture des fenêtres est possible dans les locaux non climatisés.

5.5.2 Quantification des impacts environnementaux liés à la climatisation individuelle

5.5.2.1. Etat des lieux

Ce chapitre aura été l'occasion d'effectuer un état des lieux des consommations énergétiques et des émissions de GES engendrées par l'usage de la climatisation individuelle dans le parc existant¹⁵⁴ français.

La surface couverte par des climatiseurs individuels dans le parc tertiaire est environ deux fois plus importante que celle du secteur résidentiel. Les taux de pénétration que nous avons estimés montrent que la climatisation individuelle est assez employée dans le secteur tertiaire où elle représente environ 25 % des surfaces totales, et peu implantée dans le résidentiel avec seulement 2 à 5 % des logements équipés sur l'ensemble du territoire.

D'autre part, nous avons estimé qu'à l'échelle nationale, la quantité d'électricité consommée par les climatiseurs individuels était en 2005 de l'ordre de 2 TWh /an, dont la majorité pour les pièces de bureaux (83 %).

Enfin, dans l'hypothèse où 95 % des fluides restant en fin de vie des appareils sont récupérés, nous évaluons à 0,5 Mt de CO_{2e-q} les émissions annuelles de GES engendrées par l'usage de la climatisation individuelle. Si tel n'est pas le cas et que la quasi-totalité (90 %) des fluides frigorigènes sont émis dans l'atmosphère, alors il faut augmenter l'estimation précédente de 0,4 Mt de CO_{2e-q}.

5.5.2.2. Prospective à horizon 2030

L'exercice de prospective nous aura permis de quantifier l'impact possible du développement de la climatisation individuelle sur les consommations énergétique et les émissions de GES à l'échelle nationale. Pour ce faire, nous avons supposé que la France connaîtrait un développement de la climatisation semblable à celui qu'ont connue les Etats-Unis.

Une première conclusion importante est que le secteur résidentiel, marginal jusqu'alors, est susceptible de devenir prépondérant en 2030. Il représenterait 90 % des surfaces climatisées par des appareils individuels.

En l'absence de mesure de maîtrise de la demande d'électricité, la consommation électrique se verrait augmentée d'un facteur 4,5 pour atteindre 7,7 TWh/an alors que les émissions annuelles de GES atteindraient 2,6 Mt de CO_{2e-q}.

La mise en place d'actions de réduction de la demande d'énergie engendrerait cependant une réduction importante des consommations d'électricité (de l'ordre de 5,3 TWh) ainsi que des émissions de GES (1,4 Mt de CO_{2e-q} évitées annuellement).

5.5.2.3. Prospective à horizon 2050 dans l'éventualité d'un réchauffement climatique

La prise en compte du changement climatique¹⁵⁵ entraîne un développement beaucoup plus important de la climatisation individuelle dans le secteur résidentiel.

Ainsi, en l'absence de mesure de maîtrise de la demande d'électricité, la consommation électrique se verrait augmentée d'un facteur 12 pour atteindre 22 TWh/an alors que les émissions annuelles de GES atteindraient 7 Mt de CO_{2e-q}.

La mise en place d'actions de réduction de la demande d'énergie permettrait cependant de réduire significativement les consommations d'électricité et les émissions de GES qui s'élèveraient alors à environ 3,7 TWh/an, et 2,3 Mt de CO_{2e-q}.

¹⁵⁴ Que nous définissons comme l'ensemble des bâtiments construits avant 2005.

¹⁵⁵ Les hypothèses adoptées sont décrites au chapitre 3.

5.5.2.4. Facteurs amplificateurs non pris en compte

L'étude du phénomène d'îlot urbain

Dans des secteurs urbains denses, la température de l'air est sensiblement plus élevée qu'aux alentours. Ce phénomène microclimatique, connu sous le nom « d'effet d'îlot thermique », a été présenté au chapitre 1 mais n'a pu être étudié en détail par la suite.

L'effet d'îlot urbain contribue à augmenter la consommation d'énergie dans les bâtiments climatisés et à réduire le potentiel de rafraîchissement de la ventilation naturelle, notamment nocturne.

L'impact de ce phénomène sur la demande de climatisation et le potentiel de la ventilation nocturne a été étudié par Kolokotroni et *al.* (2006) pour la ville de Londres. En raison de l'effet d'îlot, la consommation de climatisation dans les bureaux se voit augmenter de 20 % à Londres par rapport à la campagne environnante. De plus, la simulation de bâtiments de bureaux montre que la climatisation est souvent nécessaire dans des bureaux situés à l'intérieur de la mégapole londonienne alors qu'elle ne le serait pas en zone rurale (toutes choses égales par ailleurs).

Ayant vu que la climatisation individuelle se développera essentiellement dans le secteur résidentiel et étant donné que 75 % de la population française vit en zone urbaine, nous devons garder à l'esprit que le phénomène d'îlot urbain peut considérablement augmenter l'impact de la climatisation en France. Il impliquerait en effet un renforcement de la pénétration de cet usage (en raison notamment du potentiel de rafraîchissement limite de la ventilation naturelle), et un accroissement des consommations unitaires de climatisation.

Les climatiseurs mobiles

Si les climatiseurs mobiles n'ont pu être étudiés en détail dans cette thèse, ils l'ont été dans le cadre du projet sur l'éco-conception des climatiseurs individuels auquel nous avons participé (Rivière et *al.*, 2009).

Les climatiseurs mobiles présentent les particularités de ne pas nécessiter d'installation, d'être directement disponibles dans les magasins et d'être vendus à des prix beaucoup plus abordables que les appareils fixes. Leur potentiel de pénétration est élevé dans le secteur résidentiel où ce type d'appareil est massivement recherché lors de vagues de chaleur (achat d'impulsion). La prise en compte des climatiseurs mobiles tendrait donc à amplifier l'impact de la climatisation individuelle.

Des incertitudes importantes persistent cependant sur leurs conditions d'usage. De par leur constitution, ces appareils ont des efficacités énergétiques significativement plus faibles que celles des appareils fixes (Rivière et *al.*, 2009). D'autre part, ces appareils influent sur la ventilation du local en rejetant à l'extérieur, l'air pris dans la pièce pour refroidir le condenseur, et en introduisant donc de l'air extérieur à l'intérieur de la pièce. Cette interaction ventilation/climatisation engendre une réduction des besoins de refroidissement lorsque la température de l'air extérieur est moins élevée qu'à l'intérieur, et une augmentation de ces besoins dans le cas contraire. Enfin, il existe une grande incertitude sur leur utilisation par les occupants. Le confort fourni étant généralement considéré comme de moins bonne qualité que celui des climatiseurs fixes (nuisances sonores, caractère local du refroidissement...), il est difficile de savoir dans quelle mesure ces appareils sont utilisés (quelques heures par an ? sur l'ensemble de la saison d'été ?). On peut d'ailleurs légitimement penser que dans un certain nombre de situations, ces appareils ne constituent qu'une solution de transition et sont vite remplacés par des climatiseurs fixes qui permettent un meilleur confort (thermique et sonore).

5.5.3 Recommandations

5.5.3.1. Interdire la climatisation ?

Nous avons vu que le recours à la climatisation n'était généralement pas optimal du point de vue sociétal et il semblerait donc légitime de lutter contre le développement de la climatisation individuelle en interdisant ces appareils ou en les taxant lourdement.

Cependant, il faut être conscient que la prise en compte des nuisances sonores et du phénomène d'îlot urbain peut modifier cette conclusion et rendre la climatisation justifiée socialement. Dès lors, il apparaît difficile d'adopter une position catégorique concernant le bien fondé de la climatisation en France.

Afin de réduire la pénétration de cet usage, une solution consiste à rapprocher l'optimum sociétal de l'optimum privé en jouant sur le montant des taxes qui pèsent d'une part, sur les climatiseurs, et d'autre part, sur les solutions permettant d'éviter la climatisation. Cependant, cela ne doit pas proscrire le recours à la climatisation qui est justifiée socialement dans certains cas.

5.5.3.2. Améliorer l'enveloppe des bâtiments

Faciliter le recours aux améliorations d'enveloppe permettant de réduire les besoins de refroidissement et l'inconfort estival

Nous avons vu qu'il existait aujourd'hui de forts potentiels d'atténuation des besoins de refroidissement et de l'inconfort estival en mettant en place des stratégies de réduction des apports (internes et externes) associés à de la ventilation naturelle ou mécanique.

Les actions à favoriser du point de vue sociétale ont été rappelées ci-dessus (partie 5.5.1) et les conflits et synergies existant entre les points de vue privé et sociétal ont été identifiés dans le présent chapitre. Il conviendrait maintenant d'examiner la mise en place d'instruments (incitations fiscales...) de façon à favoriser et à généraliser les solutions contribuant, d'une part, à améliorer le confort thermique d'été sans recourir à la climatisation et, d'autre part, à réduire les consommations d'énergie dans les locaux climatisés.

Intégrer la préoccupation du confort d'été lors de la construction ou de la rénovation de bâtiments

La rénovation de l'enveloppe des bâtiments, nécessaire dans le but de réduire les consommations de chauffage, peut détériorer de façon importante le confort d'été et doit donc s'accompagner d'une stratégie efficace de lutte contre l'inconfort estival. Des outils d'aide à la conception ou à la rénovation doivent permettre d'intégrer des solutions de confort d'été et notamment la ventilation naturelle qui ne peut plus être négligée ou traitée grossièrement. Une mauvaise prise en compte du confort d'été au moment de la conception ou de la rénovation peut mener à l'installation, après coup, d'appareils de climatisation qui auraient pu être évités.

Intégrer la perspective du changement climatique lors de la construction ou de la rénovation de bâtiments

La perspective du changement climatique nécessite des actions cohérentes permettant d'adapter le parc bâti à des températures plus élevées tout en réduisant sa contribution aux émissions de gaz à effet de serre. Ceci implique que les opérations de rénovation et de construction ne soient pas uniquement basées sur les climats passés mais aussi sur les évolutions attendues pendant le cycle de vie du bâtiment. Des outils d'aide à la conception ou à la rénovation permettant d'intégrer des fichiers climatiques extrêmes devraient être développés et utilisés.

5.5.3.3. Améliorer les performances des équipements de climatisation

Améliorer l'efficacité énergétique du parc de climatiseurs individuels

Dans le cadre de cette thèse, nous avons développé une méthode d'évaluation des performances saisonnières des climatiseurs. Une première recommandation consiste en l'adoption d'une telle méthode qui permettrait une comparaison équitable des appareils vendus sur le marché, et une valorisation des améliorations qu'apportent certains constructeurs sur le fonctionnement des appareils en conditions non nominales.

Nous avons vu que la mise en place d'exigences de performance dont les niveaux étaient basés sur l'optimum privé était un moyen judicieux pour réduire les émissions de GES et les consommations d'énergie. A court terme, interdire les climatiseurs dont l'efficacité est inférieure à 4,5 semble pertinent et permettrait des économies de l'ordre de 30 %, toutes choses égales par ailleurs.

L'évolution du prix des énergies, des technologies et l'éventualité du changement climatique implique une mise à jour régulière des niveaux de performances exigés.

Etudier le potentiel de climatiseurs fonctionnant avec des fluides naturels

Nous avons vu qu'une fois les mesures de MDE mises en place, une réduction supplémentaire des émissions de GES nécessitait de diminuer l'impact des fluides frigorigènes notamment *via* l'utilisation de fluides naturels. Comme nous l'avons souligné au chapitre 4, en l'absence d'information sur les performances énergétiques et économiques de systèmes fonctionnant avec des fluides naturels, il ne nous a pas été possible d'évaluer leur potentiel. Il est aujourd'hui nécessaire d'anticiper un développement de la climatisation individuelle en travaillant à l'éclosion de ces technologies, dont la pertinence devra être évaluée en tenant compte des émissions de GES directes et indirectes.

5.5.3.4. Veiller à une récupération efficace des fluides frigorigènes lors de la désinstallation des appareils

Dans une optique d'atténuation des émissions de GES, la mise en place d'une filière de récupération et de traitement de fluides frigorigène est apparue fondamentale (respect de la directive européenne F-Gas (CE, 2006)). Elle nécessite notamment l'emploi d'entreprises spécialisées pour la récupération, l'utilisation de matériels adéquats pour le confinement et le transport du gaz, et l'exploitation de filières dédiées au traitement (incinération, régénération).

Ce type de filière existe déjà pour les équipements de froid dont les circuits de fluides frigorigènes sont étanches (réfrigérateurs), ce qui n'est pas le cas des appareils objets de notre étude. Un des points clés concernant les climatiseurs individuels, sera d'assurer que le démontage des installations est effectué par des professionnels formés, ce qui nécessite, outre la mise en place de formations, un système de contrôle ou de rétribution afin d'inciter les propriétaires à faire réaliser ce travail.

5.5.3.5. Agir sur le comportement des occupants

Les comportements des occupants nous sont apparus essentiels. Du comportement des occupants dépendent la pénétration de la climatisation (de bonnes pratiques permettent souvent de se passer de climatisation) et l'impact de cette dernière (consignes adaptées, utilisation des protections solaires, maintenance des appareils, récupération des fluides en fin de vie).

Dans les résidences climatisées, un point important est que l'on peut difficilement se reposer sur le facteur coût pour inciter les occupants à une utilisation optimale des protections solaires et à un choix pertinent de la consigne. Les économies réalisées par les ménages sur la facture d'énergie restent en effet très modestes.

L'information, l'éducation, la sensibilisation sont alors les facteurs déterminants pour, d'une part, inciter les occupants à respecter (et redécouvrir) les bonnes pratiques¹⁵⁶, et d'autre part, faire évoluer les exigences des occupants en matière de confort¹⁵⁷.

¹⁵⁶ Que ce soit dans les locaux climatisés ou non climatisés

5.5.3.6. Mettre en place des politiques urbaines en accord avec le souhait de réduire l'impact de la climatisation

Nous avons vu qu'une conclusion importante était que le secteur résidentiel, marginal jusqu'alors, devenait prépondérant en 2030, et couvrirait 90 % des surfaces climatisées par des appareils individuels. Dès lors, étant donné que la population urbaine représente 75 % de la population totale, les politiques urbaines ont un rôle à jouer essentiel pour infléchir la demande de climatisation individuelle.

Limiter l'effet d'îlot thermique urbain

Les solutions permettant de réduire le phénomène d'îlot urbain sont bien connues (Adnot et *al.*, 2004) et consistent principalement à développer le recours à l'utilisation de la végétation et de surfaces réfléchissantes pour recouvrir les trottoirs et les bâtiments.

Réduire les nuisances sonores

Les nuisances sonores peuvent être un élément déclencheur du recours à la climatisation car elles réduisent le potentiel de la ventilation naturelle, notamment nocturne dans le secteur résidentiel.

Il conviendrait donc d'identifier les zones soumises à des nuisances sonores importantes et de déterminer des possibilités d'amélioration : augmentation du contrôle de véhicules (deux-roues notamment), réduction des vitesses limites, murs anti-bruit...

Intégrer les spécificités de l'environnement urbain dans les démarches de conception et de rénovation des bâtiments et dans les aménagements urbains

La prise en compte des spécificités de l'environnement urbain dans les démarches de conception et de rénovation des bâtiments passe par le développement des connaissances sur la micro-climatologie urbaine (température et vitesse d'air notamment). Des recherches sont en cours pour améliorer la modélisation des climats urbains. On peut citer par exemple les recherches menées par le laboratoire CERMA¹⁵⁸ avec le développement de Solene, un logiciel de simulation d'ensoleillement, d'éclairement et de rayonnement thermique (Bouyet, 2009), ou encore les travaux d'Allard et Ghiaus (2004) menés dans le cadre du projet URBVENT pour évaluer le potentiel de ventilation naturelle en site urbain.

La généralisation de l'utilisation de ce type d'outils permettra une meilleure évaluation du comportement des bâtiments situés en zone urbaine (consommation d'énergie, confort des occupants) et de meilleures décisions en termes de choix de conception et d'aménagements.

¹⁵⁷ Voir l'exemple du programme japonais « Cool Biz » présenté au chapitre 1 (partie 1.1.4.2) qui consiste à adopter des codes vestimentaires moins stricts dans les bureaux.

¹⁵⁸ Centre de recherche méthodologique d'architecture de l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Nantes.

Conclusion générale

Retour sur le travail réalisé dans le cadre de cette thèse

Si la climatisation individuelle est encore marginale en France, les ventes d'appareils lors des dernières canicules et l'exemple de la climatisation dans l'automobile ont montré que sa généralisation était tout à fait envisageable. Susceptible d'être accentué par le changement climatique, ce poste de consommation pourrait, à terme, faire augmenter significativement les consommations d'électricité, les émissions de GES, et fragiliser les réseaux électriques. Des solutions existent cependant pour concilier le besoin de confort d'été et la nécessaire réduction des impacts de la climatisation, telles que l'amélioration des équipements, l'installation de protections solaires ou encore le recours à la ventilation nocturne.

Dans un contexte français, l'objet de cette thèse fut d'évaluer certaines de ces solutions sous l'angle coût-bénéfice afin d'établir des recommandations sur les mesures à privilégier en vue de diminuer les impacts environnementaux liés au confort d'été. L'adoption d'une méthodologie coût-bénéfice nécessitait une quantification des performances des différentes solutions étudiées, en termes de coûts, d'impacts environnementaux et de réduction de l'inconfort dans les locaux non climatisés.

Dans un premier temps (chapitre 2), nous avons éclairci le concept d'ambiance climatique confortable (notamment les différences entre locaux climatisés et non climatisés) puis développé des méthodes de monétisation des coûts d'inconfort et des externalités qui seront ensuite intégrées dans l'évaluation économique de différentes solutions d'amélioration du confort d'été.

Après coup (chapitre 3), nous avons étudié des actions d'amélioration du confort d'été portant sur l'usage et l'enveloppe du bâtiment, et quantifié leurs potentiels en termes de diminution des besoins de refroidissement dans les pièces climatisées et de réduction de l'inconfort estival dans les pièces non climatisées. De plus, nous avons analysé l'impact, sur ces résultats, du changement climatique et des rénovations de bâtiment, qui sont principalement orientées vers une réduction des consommations de chauffage.

Au chapitre 4, nous avons identifié et estimé les potentiels d'amélioration des performances des appareils de climatisation et les surcoûts sont associés à ces améliorations. Dans ce cadre, nous avons réalisé une Analyse en Cycle de Vie des climatiseurs individuels et développé une méthode d'évaluation des performances saisonnières qui permet d'apprécier l'efficacité énergétique des appareils en tenant compte de leur fonctionnement non nominal.

Dans notre dernier chapitre, nous avons effectué une analyse coût bénéfice de différentes actions d'amélioration du confort d'été en adoptant les points de vue privé et sociétal. Ceci nous a amené à exprimer des recommandations concernant les mesures à favoriser en France, et à mettre en exergue les conflits et synergies existants entre les configurations optimales du point de vue privé et celles qui le sont du point de vue sociétal. L'influence éventuelle d'un changement climatique et d'une augmentation du prix des énergies a aussi été étudiée.

Enfin, nous avons réalisé un travail prospectif en vue d'estimer l'impact que pourrait avoir la climatisation dans le parc existant français aux horizons 2030 et 2050. La part du secteur résidentiel, marginale jusqu'alors, est susceptible de devenir prépondérante. En 2030, en l'absence de mesure de réduction des impacts environnementaux, la consommation électrique pourrait s'élever à 7,7 TWh/an et les émissions annuelles de GES pourrait atteindre 2,6 Mt de CO_{2e-q}. La mise en place de telles mesures engendrerait cependant une réduction importante des consommations d'électricité (de l'ordre de 5,3 TWh) ainsi que des émissions de GES (1,2 Mt de CO_{2e-q} évitées annuellement). A horizon 2050 et avec l'hypothèse d'un réchauffement climatique, nos résultats aboutissent à une augmentation de 55 % des consommations d'électricité et de 65 % des émissions de GES par rapport à 2030, dans le cas où des mesures de réduction des impacts environnementaux seraient mises en place.

Au final, ce travail de thèse aura permis d'améliorer l'état des connaissances en matière d'évaluation et de réduction des impacts de la climatisation individuelle en France. D'autre part, il est aussi à l'origine d'apports méthodologiques portant sur le développement d'une méthodologie coût-bénéfice appliquée au confort d'été, et notamment sur l'intégration et la monétisation des coûts d'inconfort.

Éléments de perspective

L'évaluation des coûts

Au cours de ce travail de thèse, nous avons observé qu'il existait des incertitudes importantes concernant les coûts que nous avons utilisés. Celles-ci sont dues à l'essence même du travail d'évaluation des coûts¹⁵⁹, mais aussi au fait que peu de travaux sont réalisés sur le sujet. Idéalement, un travail approfondi sur l'estimation des coûts aurait été approprié de façon à quantifier les dispersions existantes et à pouvoir mener des analyses de sensibilité. De façon générale, nous déplorons le faible nombre d'études et d'enquêtes portant sur l'évaluation des coûts du marché. Ces derniers constituent pourtant des informations fondamentales pour apprécier les investissements en matière de réduction des impacts environnementaux.

L'étude de l'usage *in situ* des climatiseurs

Dans le but de compléter ce travail de thèse, il serait intéressant de mieux connaître les usages *in situ* des climatiseurs sur lesquels les connaissances actuelles sont assez éparpillées. Des résultats empiriques concernant l'efficacité des climatiseurs, les consignes adoptées, ou encore les durées de fonctionnement (et les différences entre appareils fixe et mobile) seraient tout à fait bénéfiques en vue d'améliorer les exercices d'estimation des impacts de la climatisation individuelle, et de déterminer des mesures adaptées dans ce domaine.

L'analyse des liens entre pollution sonore et climatisation individuelle

Les liens entre pollution sonore et climatisation individuelle constituent un cercle vicieux. En effet, les nuisances sonores peuvent justifier le recours à la climatisation et cette dernière est elle-même à l'origine de nuisances sonores (unité extérieure). Traité de façon sommaire dans cette thèse, l'impact de la pollution sonore sur le développement de la climatisation mériterait d'être examiné de façon plus détaillée. D'autre part, l'impact d'une généralisation de la climatisation individuelle sur l'environnement sonore, notamment en milieu urbain, nécessiterait d'être étudié.

L'évaluation du potentiel de solutions n'ayant pas été étudiées dans le cadre de cette thèse

La liste des actions d'amélioration du confort d'été étudiées dans cette thèse est loin d'être exhaustive. Certains développements permettront l'émergence sur le marché de nouvelles technologies qui ne sont pas encore matures ou restent actuellement peu utilisées. Les matériaux à changement de phase, les toitures végétalisées, les appareils de climatisation solaire, les climatiseurs fonctionnant avec des fluides naturels sont, entre autres, des solutions dont le potentiel mériterait d'être étudié.

La monétisation de l'inconfort thermique

Dans le cadre de cette thèse, nous avons développé une méthode de monétisation de l'inconfort thermique qui repose essentiellement sur l'analyse bibliographique d'études portant sur la productivité des occupants dans le secteur tertiaire. Pour compléter ce travail, il nous semblerait judicieux de réaliser des études en vue d'améliorer l'estimation du coût de l'inconfort dans le secteur résidentiel. Des méthodes de type « évaluation du consentement à payer » seraient par exemple adaptées à cet objectif. Les résultats obtenus permettraient de mieux connaître les exigences de confort des occupants, et ouvriraient des possibilités de définition d'instruments économiques pertinents en vue d'orienter les choix des consommateurs en matière de confort d'été.

¹⁵⁹ Les coûts de biens remplissant une fonction identique peuvent varier de façon très importante (qualité du produit, pratiques de ventes...).

Références bibliographiques

Chapitre 1

ADEME, 2003, Chiffres clés du bâtiment.

ADEME et CSTB, Mars 2004, Plan d'actions sur la climatisation des bâtiments.

Adnot J. et al., mai 1999, Energy Efficiency of Room Air-Conditioners (EERAC) for the Directorate General Transportation-Energy of the Commission of the European Union.

Adnot J., Alvarez S., Klitsikas N., Lopes C., Orphelin M., Sánchez F., Santamouris M., 2004, Cooling the Cities - Rafraîchir les villes, Energy Efficient Cooling Systems & Techniques for Urban Building, Presses de l'École des Mines de Paris.

Assemblée Nationale, 2008, Rapport AN N° 1198 Tome III (XIIIÈME Législature) Première lecture, disponible sur : <http://www.senat.fr/commission/fin/pjlf2009/articles/50/501.html>.

Barbusse S., Gagnepain L., mai 2003, La climatisation automobile, Impact énergétique et environnemental, Données et référence, ADEME – Département technologies des transports.

Boiteux M., 2001, Transport : choix des investissements et coûts des nuisances, Commissariat Général du Plan.

Broc J.S., Adnot J., Bourges B., Thomas S., 2007, Evaluation and Monitoring for the EU Directive on Energy End-Use Efficiency and Energy Services, Task 4.1: Definition of the process to develop harmonised bottom-up evaluation methods.

Brown R., Borgeson S., Koomey J., 2008, Building-Sector Energy Efficiency Potential Based on the Clean Energy Futures Study, disponible sur : www.aps.org/energyefficiencyreport/report/energy-bldgs.pdf.

BSRIA, 2005, World Market for Air Conditioning, disponible sur : www.bsria.co.uk.

Cantat O., 2004, L'îlot de chaleur urbain parisien selon les « types de temps », Norois, n°191.

CEN, 2004, EN standard 14511, Air conditioners, liquid chilling packages and heat pumps with electrically driven compressors for space heating and cooling.

CLER, mai - juin 2005, CLER infos n° 47, Bulletin bimestriel du Comité de Liaison Energies Renouvelables.

Clim'Info, 28 février 2006, La climatisation en France en 2005.

Clim'Info, juillet - octobre 2007, Climatisation : les chiffres 2006 du marché français, CVC.

Commission Européenne, 2002, Commission Directive 2002/31/EC of 22 March 2002 implementing Council Directive 92/75/EEC with regard to energy labelling of household air-conditioners.

Commission Européenne, 2006, Regulation N° 842/2006 of the European Parliament and of the Council of 17 May 2006 on certain fluorinated greenhouse gases.

Dubreuil V., Quenol H., Planchon O., Clergeau P., 2008, Variabilité quotidienne et saisonnière de l'îlot de chaleur urbain à Rennes : premiers résultats du programme ECORURB, XXIème colloque de l'Association Internationale de Climatologie Montpellier 2008.

Dufresne J.L., Salas y Melia, D., Denvil S., Tyteca S., Arzel O., Bony S., Braconnot P., Brockmann, ., Cadule P., Caubel A., Chauvin F., Deque M., Douville H., Fairhead L., Fichet T., Foujols M.A., Grandpeix J.Y., Gueremy J.F., Hourdin F., Idelkadi A., Krinner G., Levy C., Madec G., Marquet P., Marti O., Musat I., Planton S., Royer J.F., Swingedouw D., Voldoire A., Friedlingstein P., 2006, Simulation du climat récent et futur par les modèles du CNRM et de l'IPSL, La Météorologie – n° 55.

Energie Plus, 1^{er} décembre 2003, Energie Plus n°316.

Eurovent-Certification, 2006, Directory of certified products, <http://www.eurovent-certification.com>

Feldmann C., Schwarzberg C., Janvier - Février 2009, Confort d'été et isolation thermique, CVC N°857.

GIEC, 2007, Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Reisinger, A.].

Giraud, P.N., 2004, Cours donné à l'école des Mines, Initiation à l'économie, Chapitre 9. L'Etat et les imperfections de marché.

- Gollier C., 2005, Quel taux d'actualisation pour quel avenir ?, Revue française d'économie, Volume 19, Numéro 4, p. 59 – 81.
- Heat Island Group, 2009, disponible sur : <http://heatisland.lbl.gov/HighTemps/>.
- Institut Français de l'Environnement, 2009, Données essentielles de l'environnement, disponible sur : www.ifen.fr.
- Koizumi S., 2006, Energy Efficiency of Air Conditioners in Developing Countries and the Role of CDM, Information Paper, OECD/IEA.
- Lovins A.B., 2004, Energy Efficiency, Taxonomic Overview, Encyclopedia of Energy 2:383-401.
- OCDE, mars 2007, Évaluer les politiques environnementales, Publications de l'OCDE, disponible sur : <http://www.oecd.org/dataoecd/44/28/38290106.pdf>.
- Orphelin M., 1999, Méthodes pour la reconstitution de courbes de charge agrégées des usages thermiques de l'électricité, thèse de doctorat de l'Ecole des Mines de Paris.
- Pagliano, L., Carlucci S., Roscetti A., Zangheri P., 2008, Recent Trends and Developments Regarding Summer Comfort and Low Energy Cooling in Italy, AIVC.
- Philibert C., 1999, The economics of climate change and the theory of discounting, Energy Policy, 27, pp. 913-927.
- RF, 2007, Arrêté du 3 mai 2007 relatif aux caractéristiques thermiques et à la performance énergétique des bâtiments existants, Journal Officiel du 17 mai 2007.
- Rivière P. et al, 2009, Preparatory study on the environmental performance of residential room conditioning appliances (airco and ventilation), disponible sur : www.ecoaircon.eu.
- Yuangao W., Zhiwei L., 2008, Influence of air conditioners utilization on urban thermal environment, Applied Thermal Engineering.

Chapitre 2

- Adnot et al., octobre 2008, Preparatory study on the environmental performance of residential room conditioning appliances (airco and ventilation), Study on comfort fans (final report).
- AIE, 2005, World Energy Outlook, Agence Internationale de l'Energie, Paris.
- Ambrosi P., Courtois P., 2004, Impacts du changement climatique et modélisation intégrée, la part de l'arbitraire, *Natures Sciences Sociétés* 12, 375-386.
- ASHRAE, 2004, ASHRAE Standard 55-2004, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating, and Air conditioning Engineers, Inc.
- Baarsma, B.E., Berkhout, P.H.G., Hop, J.P., 2005, Valuation of the quality of the electricity grid—power outages have a price too. SEO Discussion Paper 41, University of Amsterdam.
- Barker, T., I. Bashmakov, A. Alharthi, M. Amann, L. Cifuentes, J. Drexhage, M. Duan, O. Edenhofer, B. Flannery, M. Grubb, M. Hoogwijk, F. I. Ibitoye, C. J. Jepma, W.A. Pizer, K. Yamaji, 2007: Mitigation from a cross-sectoral perspective. In *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Baudet M.B., 2009, 600 000 emplois "verts" d'ici à 2020 : faut-il y croire ?, *Le Monde* du 29 juillet 2009.
- Brager, G.S., avril 1992, Using laboratory-based models to predict comfort in office buildings, *ASHRAE Journal*.
- Boiteux M., 2001, Transport : choix des investissements et coûts des nuisances, Commissariat Général du Plan.
- Candas, V., 1999, Confort thermique. *Techniques de l'ingénieur* BE 9085.
- Carlsson, F., Martinsson, P., 2004, Willingness to pay among Swedish households to avoid power outages - a random parameter Tobit model approach. Working Papers in Economics no. 154, Department of Economics, Gothenburg University.
- Commission Européenne (CE), 2002, Directive 2002/91/EC du Parlement Européen et du Conseil pour la Performance Energétique des Bâtiments (D.P.E.B.).
- Commission Européenne (CE), 2003, External costs, Research on socio-environmental damages due to electricity and transport, European Commission, Directorate General for research, EU 20198.
- Commission Européenne (CE), 2005a, Externalities of Energy, Methodology 2005 Update, Edited by Peter Bickel and Rainer Friedrich, European Commission, EUR 21951.
- Commission Européenne (CE), 2005b, Doing more with less, Green paper on energy efficiency, Directorate-General for Energy and Transport, European Commission, ISBN 92-894-9819-6.
- Commission Européenne (CE), 2008, European Commission, Europe in figures – Eurostat yearbook 2008, Eurostat statistical books, ISSN 1681-4789.
- CEN, 2005, prEN15251, Criteria for the Indoor Environment including thermal, indoor air quality, light and noise.
- CEN, 2006, NF EN ISO 7730, Détermination analytique et interprétation du confort thermique par le calcul des indices PMV et PPD et par des critères de confort thermique local.
- CEN, 2007, NF EN ISO 15251, Critères d'ambiance intérieure pour la conception et évaluation de la performance énergétique des bâtiments couvrant la qualité de l'air intérieur, le thermique, l'éclairage et l'acoustique.
- Cena K.M., de Dear R., 1998, Field study of occupant comfort and office thermal environments in hot-arid climate, Final report ASHRAE 921-RP, ASHRAE Inc., Atlanta.
- de Dear R., Leow K.G., Ameen A., 1991, Thermal comfort in the humid tropics. Part I. Climate chamber experiments on temperature preferences in Singapore, *ASHRAE transactions* 97 (1).

- de Dear R., Fountain M., Popovic S., Watkins S., Brager G., Arens E., Benton C., 1996, A field study of occupant comfort and office thermal environments in a hot-humid climate, Final report ASHRAE 702-RP, ASHRAE Inc., Atlanta.
- de Dear R., Brager G.S., 1998, Developing an adaptive model of thermal comfort and preference, ASHRAE Transactions 104 (1).
- de Dear R., Brager G.S., 2002, Thermal comfort in naturally ventilated buildings. Revisions to ASHRAE Standard 55. Energy and buildings 34, 549-561.
- Domini G., Molina J., Martello C., Ho Ching Lai D., Ho Lai K., Yu Chang C., La Flamme M., Nguyen V.H., Haghibat F., 1996, Field study of occupant comfort and office thermal environments in a cold climate, Final report ASHRAE 821-RP, ASHRAE Inc., Atlanta.
- Egenhofer C., Jansen J.C., Bakker S.J.A., Jussila Hammes J., 2006, Revisiting EU policy options for tackling climate change – A social cost-analysis of GHG emissions reduction strategies, Centre for European Policy Studies, ISBN 978-92-9079-631-2.
- Fanger, P.O. 1970, Thermal comfort, Mc Graw-Hill.
- Federspiel C., Liu G., Lahiff M., et al., 2002, Worker performance and ventilation: of individual data for call-center workers. Proceeding of Indoor Air 2002, pp. 796-801.
- Fisher B.S., N. Nakicenovic, K. Alfsen, J. Corfee Morlot, F. de la Chesnaye, J.-Ch. Hourcade, K. Jiang, M. Kainuma, E. La Rovere, A. Matysek, A. Rana, K. Riahi, R. Richels, S. Rose, D. van Vuuren, R. Warren, 2007: Issues related to mitigation in the long term context, In Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge.
- Fishman D.S., Pimbert S.L., 1982, The thermal environment in offices. Energy and Buildings, Vol. 5, No. 2, pp. 109-116.
- Gagge A.P., Burton A.C., and Bazatt H.C., 1941, A practical system of units for the description of heat exchange of man with his environment, Science 94:428-30.
- Gagge A.P., Fobelets A.P., Berglund L.G., 1986, A standard predictive index of human response to the thermal environment, ASHRAE transactions 92(1).
- Galus C., 2008, L'activité des insectes pollinisateurs est évaluée à 153 milliards d'euros, Selon une étude franco-allemande dirigée par Jean-Michel Salles (CNRS, Montpellier) et Bernard Vaissière (Laboratoire de pollinisation et écologie des abeilles, INRA, Avignon), Le Monde du 19 septembre 2008.
- Gay J.B., 2001, Cours de mise à niveau, Confort et Santé, Master en Architecture et Développement Durable EPFL.
- Giraud P.N., 2004, Cours donné à l'école des Mines, Initiation à l'économie, Chapitre 9. L'Etat et les imperfections de marché, Année 2004 – 2005.
- Girmens G., juin 2006, Développement durable et principes économiques, IDEES, la revue des sciences économiques et sociales, 144.
- Givoni B., 1978, L'Homme, l'architecture et le climat, Paris: éd. Du moniteur.
- Grignon-Massé L., Adnot J., Rivière P., 2007, Environmental impact and discomfort relief of summer comfort appliances, 9th REHVA World Congress Clima 2007, 10-14 June 2007, Helsinki.
- Grignon-Massé L., Adnot J., Rivière P., 2008a, Towards adaptive PMV/PPD indices for European climates..., 2008 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, 17 – 22 Aug 08, Pacific Grove, California.
- Grignon-Massé L., Adnot J., Rivière P., 2008b, A preliminary attempt to unify the different approaches of summer comfort evaluation in the European context, IEECB'08 - Fifth International Conference on Improving Energy Efficiency in Commercial Buildings, 10-11 April 2008, Francfort.
- Holland M., décembre 2001, Applications de la méthodologie d'ExternE, Pollution Atmosphérique.
- Hotelling H., 1931, The Economics of Exhaustible Resources, Journal of Political Economy, April, 39, pp 137-175.

- Humphreys M.A., 1978, Outdoor temperatures and comfort indoors. *Building Research and Practice*, 6(2) pp 92-105.
- Humphreys M.A., Nicol J.F., 1998, Understanding the adaptive approach to thermal comfort. *ASHRAE Transactions* 104 (1) pp 991-1004.
- Humphreys M.A., Nicol J.F., 2000, Outdoor temperature and indoor thermal comfort: raising the precision of the relationship for the 1998 ASHRAE database of field studies *ASHRAE Transactions* 206(2) pp 485-492.
- Institut Universitaire de Médecine du Travail de Rennes, 1999, Les ambiances thermiques, (disponible sur <http://www.med.univ-rennes1.fr>).
- Kovats S., Wolf T., Menne B., 2004, Heatwave of August 2003 in Europe: provisional estimates of the impact on mortality. *Eurosurveillance Weekly*. 11 March 2004 ; 8(11).
- Kuik O., Brander L., Tol R.S.J., 2009, Marginal abatement costs of greenhouse gas emissions: A meta-analysis, *Energy Policy* 37, 1395–1403.
- Lambert J., 2008, La valorisation du bruit : concepts, méthodes et utilisation dans les décisions, Notes de cours Master TRADD (ENSMP-ENPC), Séance du 18 décembre 2008.
- Ledrans M., 16 mai 2006, Impact sanitaire de la vague de chaleur de l'été 2003 : synthèse des études disponibles en août 2005, bulletin épidémiologique hebdomadaire, Institut de veille sanitaire.
- Link J., Pepler R., 1970, Associated fluctuations in daily temperature, productivity and absenteeism. No 2167 RP-57, *ASHRAE Transactions*, Vol 76, Part II, pp. 326-337.
- Mc Nall P.E., Jaax J., Rohles F.H., Nevins R.G. et Springer W.E., 1967, Thermal comfort (thermally neutral) conditions for three levels of activity, *ASHRAE transactions* Vol. 73-I.
- McCartney K.J., Nicol J.F., 2002a, Developing an adaptive control algorithm for Europe, *Energy and buildings* 34, pp 623-635.
- McCartney K.J., Humphreys M.A., 2002b, Thermal comfort and productivity, *Proceedings: Indoor Air 2002*.
- McKinsey & Company, janvier 2009, Pathways to a Low-Carbon Economy: Version 2 of the global greenhouse gas abatement cost curve, (disponible en version française sur le site : <http://www.lesechos.fr/medias/2009/0126//300325069.pdf>).
- Meade J. E., 1952, External Economies and Diseconomies in a Competitive Situation, *The Economic Journal*, Vol. 62, No. 245 pp. 54-67.
- Ministère de l'Équipement, des Transports, du Logement du Tourisme et de la Mer (METLTM), 2003, Mémento technique du bâtiment pour le chargé d'opération de constructions publiques, Confort thermique.
- Mouret M., Vallet M., 1995, Les effets du bruit sur la santé, Rapport pour le ministère des Affaires sociales et de la santé.
- Navrud S., 14 avril 2002, The State of the Art on Economic Valuation of Noise. Report prepared for the European Commission, DG Environment.
- Nevins R.G., Rohles F.H., Springer W., Feyerherm A.M., 1966, Temperature-Humidity Chart for thermal comfort of seated persons, *ASHRAE transactions* Vol. 72-I.
- Nicol J.F., Humphreys M.A., 1973, Thermal comfort as part of a self-regulating system. *Building research and practice (J. CIB)* 6(3), pp 191-197.
- Nicol J.F., Raja I.A., 1996, Thermal Comfort, Time and Posture: Explanatory Studies in the Nature of Adaptive Thermal Comfort, Oxford Brookes University, UK.
- Nicol J.F., Humphreys M.A., 1998, Understanding the adaptive approach to thermal comfort, *ASHRAE transactions* SF-98-7-1.
- Nicol J.F., McCartney K.J., 2001, SCATS: Final Report—Public, Oxford Brookes University, UK.
- Nicol J.F., Humphreys M.A., 2002, Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. *Energy and buildings* 34 (6).
- Nicol J.F., Humphreys M.A., 2006, Maximum temperatures in European office buildings to avoid heat discomfort, *Solar Energy* 81 pp 295-304.

- Nicol J.F., 2008, <http://www.learn.londonmet.ac.uk/student/resources/doc/comfort.html>, Notes de cours, University of North London.
- Nicol F., Humphreys M., 2009, Derivation of the adaptive equations for thermal comfort in free-running buildings in European standard EN1525, Building and Environment.
- Niemelä R., Railio J., Hannula M., Rautio S., Reijula K., 2001, Assessing the effect of indoor environment on productivity. Proceedings of Clima 2000 Conference in Napoli.
- Niemelä R., Hannula M., Rautio S., Reijula K., Railio J., 2002, The effect of indoor air temperature on labour productivity in call centers – a case study. Energy and Buildings. 34:759-764.
- Ogden J.M., R.H. Williams, E.D. Larson, 2004, Societal lifecycle costs of cars with alternative fuels/engines, Energy policy, 32, pp. 7-27.
- Parry M.L., Canziani O.F., Palutikof J.P., van der Linden P.J. and Hanson C.E., 2007, Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability, Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Quinet A., Baumstark L., Célestin-Urbain J., Pouliquen H., Auverlot D., Raynard C., 2008, La valeur tutélaire du carbone, Rapport pour le Centre d'analyse stratégique.
- Rabl A., Spadaro J., août 2005, Externalities of Energy: Extension of accounting framework and Policy Applications (ExternE-Pol), Funded by the European Community, Contrat n° ENG1-CT2002-00609, Version 2.
- Rabl A., Spadaro J.V., Zoughaib A., 2008, Environmental Impacts and Costs of Solid Waste: A Comparison of Landfill and Incineration, Waste Management & Research, vol.26, 147-162.
- Raymann R.J.E.M., Swaab D.F., van Someren E.J.W., 2008, "Skin deep: enhanced sleep depth by cutaneous temperature manipulation", Brain, 131(2):500-513.
- Rivière P. et al, 2009, Preparatory study on the environmental performance of residential room conditioning appliances (airco and ventilation), disponible sur : www.ecoaircon.eu.
- Rohles F.H., Hayter R.B., Berglund L.G., 1977, Comfort and cold and warm discomfort during summer and winter in northern and southern United States. ASHRAE Transactions, Vol. 83, Part 1.
- Rohles F. H., 1980, Temperature or temperament: a psychologist looks at thermal comfort, ASHRAE Transactions 86(1): 541-551.
- Rohles F.H., Wells W.V., 1977, The role of environmental antecedents on subsequent thermal comfort, ASHRAE Transactions, RP 194(2449), 21-29.
- Rotmans J., Dowlatabadi H., 1998, Integrated assessment of climate change: evaluation of methods and strategies, in Rayner, S., Malone, E. (Eds), Human Choice and Climate Change: An International Social Science Assessment, Washington DC.
- Réseau de Transport d'Electricité (RTE), 2009, Bilan prévisionnel de l'équilibre offre-demande d'électricité en France, Edition 2009.
- Sachs W., 1991, The development dictionary, Zed book, p 208.
- Schiller G.E., Arens E., Bauman F., Benton C., Fountain M., Doherty T., 1988, A field study of thermal environments and comfort in office buildings, Final report ASHRAE 462-RP, ASHRAE Inc., Atlanta.
- Seppanen O., W.J. Fisk, D. Faulkner, 2005, Control of temperature for health and productivity in offices. ASHRAE Transactions, 111(2): p. 680-686.
- Seppänen O., Fisk W.J., Lei Q.H., 2006, Room temperature and productivity in office work, Paper LBNL 60952 posted at the eScholarship Repository, University of California.
- Sidler O., Août 2007, Rénovation à basse consommation d'énergie des logements en France – Projet « Renaissance », Programme Concerto.
- Smil V., 2005, Energy at the crossroads, The MIT Press.
- Stern N., 2006, The Economics of Climate Change : the Stern Review, UK House of Commons, disponible sur : <http://www.hm-treasury.gov.uk/>.

- Tanabe S., Kimura K., Hara T., 1987, Thermal comfort requirements during the summer season in Japan, ASHRAE transactions 93(1).
- Tol R. J. S., 2005, The Marginal Damage Costs Of Carbon Dioxide Emissions: An Assessment Of The Uncertainties, Energy Policy 33, pp 2064-2074.
- VHK, 2005, Methodology Study Eco-Design of Energy-using Products, VHK for European Commission.
- Watkiss P., Downing T., Handley C., Butterfield R., septembre 2005, The Impacts and Costs of Climate Change. Final Report to DG Environment.
- Witterseh T., 2001, Environmental perception, SBS symptoms and performance of office work under combined exposure to temperature, noise and air pollution. PhD Thesis. International Centre for Indoor Environment and Energy, Department of Mechanical Engineering. Technical University of Denmark.

Chapitre 3

- Adnot J., Bory D., Feng G., Filfli S., Miclo M., Marchio D., Rivière P., 2005, Analyse des composantes climatisation et froid dans les appels d'électricité en été, Rapport final, Commande RTE DMA-07/04.
- Adnot et al., février 2009, Preparatory study on the environmental performance of residential room conditioning appliances (airco and ventilation), Study on residential ventilation.
- AFNOR, 1987, Norme NF X-35-121, Travail sur écran de visualisation et clavier : aménagement du local et poste de travail, juin 1987
- AFNOR, 1990, Norme NF X35-103, Ergonomie - Principes d'ergonomie visuelle applicables à l'éclairage des lieux de travail, octobre 1990.
- Alessandrini J.M., Fleury E., Filfli S., Marchio D., 2006, Impact de la gestion de l'éclairage et des protections solaires sur la consommation d'énergie de bâtiments de bureaux climatisés. Climamed, Lyon, France.
- Allard F., 1998, Natural ventilation in buildings, A design handbook, James and James Publisher, London.
- Allard F., Ghiaus C., 2004, Potentiel de la ventilation naturelle en site urbain, Climamed, Lisbonne, 16-17 avril 2004.
- Annex 28, 1995, Low Energy Cooling, Review of Low Energy Cooling Technologies, subtask 1 Report.
- Bâtiment Relations Elec (BRE), mai-juin 2000, Mensuel d'information électricité des professionnels du bâtiment n°37.
- Bolher A., Fleury E., Marchio D., Millet, J.R., Stabat P., 2002, Project ECOCLIM, Calcul des consommations des techniques de climatisation à faible consommation d'énergie.
- Brown, 2000, Sun, Wind & Light – Architectural design strategies, G.Z. Brown and Mark DeKay, Edition: John Wiley & Sons Inc.
- BSRIA, 2005, World Market for Air Conditioning 2002 – 2005, disponible sur : www.bsria.co.uk.
- Commission Européenne (CE), 2005, Directive 2005/32/EC of the European Parliament and of the Council of 6 July 2005 establishing a framework for the setting of Ecodesign requirements for energy-using products and amending council directive 92/42/EEC and directives 96/57/EC and 2000/55/EC of the European Parliament.
- Comité Européen de Normalisation (CEN), 2006, prEN 15459, Heating systems in buildings - Data requirements for standard economic evaluation procedures related to energy systems in buildings, including renewable sources.
- Comité Européen de Normalisation (CEN), 2007a, NF EN ISO 15251, Critères d'ambiance intérieure pour la conception et évaluation de la performance énergétique des bâtiments couvrant la qualité de l'air intérieur, le thermique, l'éclairage et l'acoustique.
- Comité Européen de Normalisation (CEN), 2007b, NF EN 13779, Ventilation for non-residential buildings – performance requirements for ventilation and room-conditioning systems, NF EN 13779.
- CTBA, 2009, Analyse de cycle de vie d'une fenêtre générique en bois de fabrication française, Etude confiée au CTBA par la Fédération Française du Bâtiment.
- DAEI/SESP et DGUHC, 2005, Dispersion des prix des logements anciens : une analyse à partir des bases notariales, Compte du logement 2005 et premiers résultats 2006.
- Deschaseaux C., 2009, Isolation renforcée, la plaie de l'été ?, Journal Energie Plus du 15 janvier 2009, supplément du N°418.
- Feldmann C., Schwarzberg C., 2009, Confort d'été et isolation thermique, CVC N°857, Janvier Février 2009.
- Filfli S., Alessandrini J.M., Fleury E., Marchio D., Tournie P., Damolis P., Gourmez D., 2006, Quelles solutions pour des bâtiments de bureaux climatisés à moins de 100kWh/m²/an ? Guide de solutions techniques. Contrat ARMINES/ADEME n° C0204100.
- GIEC, 2007, Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Reisinger, A.].

- Graça G.C., 2003, Simplified models for heat transfer in rooms, PhD thesis, University of California, San Diego.
- Grignon-Massé L., Adnot J., Rivière P., 2007, Environmental impact and discomfort relief of summer comfort appliances, 9th REHVA World Congress Clima 2007, 10-14 June 2007, Helsinki.
- Grignon-Massé L., Marchio D. et al., 2009, Projet Keep Cool II, WP 4 : Assessment of energy savings related to sustainable summer comfort, 3 Deliverables : Definition of base cases, Selection and specification of energy efficiency improvement actions, Assessment of energy savings.
- Hadley Centre for Climate Prediction and Research, 2009, <http://www.metoffice.gov.uk/climatechange/>.
- Jentsch M.F., Bahaj A.S., James P.A.B, 2008, Climate change future proofing of buildings - Generation and assessment of building simulation weather files, *Energy and Buildings* 40, 2148–2168.
- Kolokotroni M., Aronis A., 1999, Cooling-energy reduction in air-conditioned offices by using night ventilation, *Applied Energy* 63, 241±253.
- Marchio D., 2008, Project ClIMatisation Hybride des immeubles de Bureaux, Une boîte à outils d'aide à la décision pour la conception et la réhabilitation basse consommation des immeubles de bureaux, Livrable n°1.
- Marchio D., 2009, Projet OPTISOL Contrat ADEME/ARMINES n° : 06 04 C0119, Partie D – Rapport scientifique.
- Marion W., Urban K., 1995, User's Manual for TMY2s – Typical Meteorological Years, National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado, USA.
- Martin, A., Fletcher J., 1996, Night-cooling strategies, BSRIA technical appraisal 14/96.
- Moujalled B., 2007, Modélisation dynamique du confort thermique dans les bâtiments naturellement ventilés, Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
- Nicol J.F., Humphreys M.A., 2004, A Stochastic Approach to Thermal Comfort—Occupant Behavior and Energy Use in Buildings, *ASHRAE Transactions*, Volume 110, Part 2.
- Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique (ONERC), Stratégie nationale d'adaptation au changement climatique, La Documentation française, Paris 2007.
- Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique (ONERC), 2009, Changement climatique, Coûts des impacts et pistes d'adaptation, La Documentation française, Paris.
- Orme P., Palmer J., 2003, Control of overheating in future housing – design guidance for low energy strategies, Fabermaunsell LTD.
- Petersdorff C., Boermans T., Stobbe O., Joosen S., Graus W., Mikkers E., Harnish J., 2004, Mitigation of CO₂, Emissions from the building stock, Beyond the EU Directive on the energy performance of buildings.
- République Française (RF), 2007, Décret n° 2007-363 du 19 mars 2007 relatif aux études de faisabilité des approvisionnements en énergie, aux caractéristiques thermiques et à la performance énergétique des bâtiments existants et à l'affichage du diagnostic de performance énergétique.
- Radgen P., Oberschmidt J., avril 2008, Preparatory study on the environmental performance of fans for ventilation in non residential buildings, Final Report.
- Rivière P., Adnot J., Grignon-Massé L., 2009, Energy consumption of European residential comfort fans, EEDAL 2009, June 16-18, Berlin.
- Sidler O., Mars 2002, Etude des paramètres influant sur les consommations de climatisation dans les immeubles de bureaux, ENERTECH, Téléchargeable sur <http://sidler.club.fr>.
- Sidler O., Avril 2004, Bâtiments de logements HQE économes en énergie et en eau – Programme Restart - Evaluation des performances - Suivi lourd, ENERTECH, Téléchargeable sur <http://sidler.club.fr>.
- Sidler O., Janvier 2005, Technologies de l'information et éclairage – Campagne de mesures dans 49 ensembles de bureaux de la région PACA, ENERTECH, Téléchargeable sur <http://sidler.club.fr>.
- Sidler O., Août 2007, Rénovation à basse consommation d'énergie des logements en France – Projet « Renaissance », Programme Concerto.

- SNFA, 2008, Syndicat national de la construction des Fenêtres, façades et activités associées, Données environnementales: un nouvel atout pour les fenêtres et façades en aluminium, Communiqué disponible sur www.snfa.fr.
- Standaert P., 2005, Energy saving and CO2 reduction potential from solar shading systems and roller shutters in the EU-25.
- Sustainable Energy Research Group (SERG), 2009, CCWorldWeatherGen Climate change world weather file generator, University of Southampton, School of Civil Engineering and the Environment.
- Van Paassen AHC, Liem SH, Groninger BP, 1998, Control of night cooling with natural ventilation: sensitivity analysis of control strategies and vent openings, 19th AIVC Conference, Oslo, Norway, 20±28 September 1998.
- Van Tichelen P., Jansen B., Geerken T., Vanden Bosch M., VanHoof V., Vanhooydonck L., Vercalsteren A., 2007, EuP preparatory study, Lot 8: Office lighting, Final Report.
- Varga M., Bangens L., Cavelius R., Davison J.M., Garcia F.A., Isaksson C., Laia C., Leutgöb K., Lopes C., Nicol J.F, Pagliano L., Perednis E., Read G.E.F., 2007, Service Buildings Keep Cool: Promotion of sustainable cooling in the service building sector, Final Report.
- Weckstein M., Salagnac J.L., 2006, Changement climatique : un double défi pour le bâtiment, Géosciences n°3, mars 2006.

Chapitre 4

- ADEME, CSTB, 2004, , Plan d'actions sur la climatisation des bâtiments, version du 31 mars 2004.
- ADEME, janvier 2007, Bilan Carbone® Entreprises et Collectivités, Guide des facteurs d'émissions Version 5.0.
- Adnot J. et al., 1999, Energy Efficiency of Room Air-Conditioners (EERAC) for the Directorate General Transportation-Energy of the Commission of the European Union, May 1999.
- Air conditioning and Refrigeration Institute (ARI), 1998, Water Chilling Packages using the vapor compression cycle, ARI 550/590.
- Air conditioning and Refrigeration Institute (ARI), 2004, Performance rating of positive displacement refrigerant compressors and compressor units, ANSI/ARI Standard 540.
- Air conditioning and Refrigeration Institute (ARI), 2006, Standard for rating performance of unitary air conditioning and air source heat pump equipment, ARI 210/240.
- Barnabé F., septembre - novembre 2003, L'analyse du cycle de vie d'un climatiseur : résultats d'étude, Instantanés techniques.
- Barrault S., Clodic D, Sayon C., 2004, Inventaire des fluides frigorigènes et de leurs émissions, Document 2 : Données de base pour les inventaires de fluides frigorigènes, France.
- Bory D., 2008, Analysis and simulation of effects of operation for air conditioning audit, Thèse de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, Spécialité Energétique.
- BSRIA, 2005, World Market for Air Conditioning 2002 – 2005, disponible sur : www.bsria.co.uk.
- Comité Européen de Normalisation (CEN), 2004, EN standard 14511, Air conditioners, liquid chilling packages and heat pumps with electrically driven compressors for space heating and cooling.
- Comité Européen de Normalisation (CEN), 2006, prEN 15459, Heating systems in buildings - Data requirements for standard economic evaluation procedures related to energy systems in buildings, including renewable sources.
- Centre d'Etudes Techniques des Industries Mécaniques (CETIM), 2004, Résultats des actions collectives N° 695, Confinement des installations frigorifiques.
- Commission européenne (CE), 2003, Directive 2002/96/CE du Parlement européen et du Conseil du 27 janvier 2003 relative aux déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE).
- Commission européenne (CE), 2005, Directive 2005/32/EC du Parlement européen et du Conseil, du 6 juillet 2005, établissant un cadre pour la fixation d'exigences en matière d'écoconception applicables aux produits consommateurs d'énergie.
- Commission européenne (CE), 2006, Règlement N° 842/2006 du Parlement européen et du conseil du 17 mai 2006 relatif à certains gaz à effet de serre fluorés.
- Commission européenne (CE), 2009, Working document on possible ecodesign and energy labeling requirements for room air conditioning appliances, local air coolers and comfort fans, disponible sur : http://ec.europa.eu/energy/efficiency/ecodesign/doc/forum/2009_06_22/2009_06_22_airco_ad_fans.pdf
- Department Of Energy (DOE), Oak Ridge National Laboratory (ORNL), 2009, Heat Pump Design Model, Mark 7 Version, disponible sur : <http://www.ornl.gov/~wlj/hpdm/MarkVII.shtml>.
- Department of Trade and Industry (UK), 2005, Global watch mission report "Waste electrical and electronic equipment (WEEE): innovating novel recovery and recycling technologies in Japan".
- Ellis M., 2007, Experience with energy efficiency regulations for electrical equipment, Information Paper, OECD/IEA, In support of the G8 Plan of Action.
- Energy Star, 2007, Room Air Conditioner partner resource guide, disponible sur : http://www.energystar.gov/ia/partners/manuf_res/downloads/Room_Air_Conditioners_Partner_Resource_Guide.pdf.
- Eurovent-Certification, 2006a, Directory of certified products, <http://www.eurovent-certification.com>.
- Eurovent-Certification, 2006b, Technical data of tested products – Personal communication.

- Henderson H., Parker D., Huang Y., 2000, Improving DOE-2's RESYS Routine: User Defined Functions to Provide More Accurate Part Load Energy Use and Humidity Predictions, Presented at the 2000 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, August 20-25.
- Henderson H., novembre 2001, Study of Algorithms for Air Conditioners, Study 3 of Studies on Algorithm Development for Energy Performance Testing, Asia-Pacific Economic Cooperation, APEC Energy Working Group.
- Henderson H.I., Shirey D., Raustad R., 2007, Closing the Gap: Getting Full Performance from Residential Central Air Conditioners – Develop New Climate-Sensitive Air Conditioner: Simulation Results and Cost Benefit Analysis. FSEC-CR-CR-1716-07.
- Hitchin R., Law S., 2006, The Seasonal Efficiency of Multi-Boiler and Multi-Chiller Installations, IEECB Conference.
- IPCC/TEAP, UNEP / WMO, 2005, Special Report on Safeguarding the Ozone Layer and the Global Climate System Issues related to Hydrofluorocarbons and Perfluorocarbons, Chapter 5.
- ISO, 2005, ISO 5151 : Non-ducted air conditioners and heat pumps — Testing and rating for performance.
- Jakobsen D. et al., 2006, Norway, Development of reversible residential air conditioners and heat pumps using CO2 as working fluid, IEA Heat Pump Center Newsletter, Volume 24.
- Japan Ministry of Economy, 2002, Trade and Industry, Home Appliance Recycling law, <http://www.meti.go.jp/policy/recycle/main/english/law/home.html>.
- JRAIA, 2004a, Calculating method of annual power consumption for room air conditioners, JRA 4046.
- JRAIA, avril 2004b, The Japan Refrigeration and Air Conditioning Industry Association, LCCP of some HVAC applications, Proceedings of Earth Technologies Forum.
- JRAIA, 17 avril 2007, The Japan Refrigeration and Air Conditioning Industry Association, Presentation of Japanese part load experience, CEN TC 113 / WG 7, part load, Treviso, Italy.
- MCE, Ministerial Council on Energy forming part of the Australian National Framework for Energy Efficiency and the New Zealand National Energy Efficiency and Conservation Strategy, mars 2006, 2005 Intrusive Residential Standby Survey Report, Report for E3 2006/02.
- Ministère de l'écologie, du développement et de l'aménagement du territoire (MEDAD), 2009, disponible sur : <http://www.industrie.gouv.fr/energie/developpement/econo/cee/pdf/BAR-TH-29.pdf>.
- Ortiz et al., 2003, Evaluation of the performance potential of CO2 as a refrigerant in air to air conditioners and heat pumps: system modeling and analysis, ARTI-21CR/610-10030.
- Parken W.H., Beausoleil R.W., Kelly G.E., 1977, Factors affecting the performance of a residential air-to-air heat pump, ASHRAE Transactions, Vol.83, Pt 1.
- Rivière P., 2004, Performances saisonnières des groupes de production d'eau glacée, Thèse de doctorat en énergétique, Ecole des Mines de Paris.
- Rivière P., Grignon-Massé L., 2008, Existing seasonal performance indices for air-to-air heat pumps, IEA Heat Pump Newsletter, Volume 26 "Air Source Heat Pumps".
- Rivière P. et al, 2009, Preparatory study on the environmental performance of residential room conditioning appliances (airco and ventilation), disponible sur : www.ecoaircon.eu.
- SP, 2009, Résultats de tests effectués sur 26 pompes à chaleur air/air par l'institut national suédois d'essais et de recherche disponibles sur : <http://www.energimyndigheten.se/sv/Hushall/Testresultat/Husets-varmesystem--/Test-av-luftluft-varmepumpar>.
- SPON, 2005, SPON's Mechanical and Electrical Services Price Book, 36th edition, Spon Press.
- UNEP, 2003, Report of the Refrigeration, Air Conditioning and Heat Pumps Technical Options Committee – 2002 Assessment, UNEP Ozone Secretariat, Nairobi, Kenya.
- Van Holsteijn en Kemna (VHK), 2005, Methodology Study Eco-Design of Energy-using Products, VHK for European Commission.
- Yokota K., Matsuno Y., Yamashita M., Adachi Y., 2003, Integration of Life Cycle Assessment and Population Model for Assessing Environmental Impacts of Product Population in a Social Scale, The International of Life Cycle Assessment, Vol.8, N°3.

Chapitre 5

- ADEME, 2007, Le chiffres clés du bâtiment, Energie-Environnement.
- ADEME et RTE, 2007, Le contenu en CO₂ du kWh électrique : Avantages comparés du contenu marginal et du contenu par usages sur la base de l'historique.
- Adnot et al., 2002, EECCAC, Energy Efficiency and Certification of Central Air Conditioners, study for the D.G. Transportation-Energy (DGTREN) of the Commission of the E.U.
- Adnot J., Alvarez S., Klitsikas N., Lopes C., Orphelin M., Sánchez F., Santamouris M., 2004, Cooling the Cities - Rafraîchir les villes, Energy Efficient Cooling Systems & Techniques for Urban Building, Presses de l'École des Mines de Paris.
- Allard F., Ghiaus C., 2004, Potentiel de la ventilation naturelle en site urbain, Climamed, Lisbonne, 16-17 avril 2004.
- Axenne, TML, Ecofys, 2007, Scénarios de forte réduction des émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2050, Disponible sur <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr>.
- Bâtiment Relations Elec, mai-juin 2000, Mensuel d'information électricité des professionnels du bâtiment n°37.
- Boulanger P.M., 2007, Les barrières à l'efficacité énergétique, Reflets et perspective de la vie économique 2007/4, Tome XLVI, p 49-62.
- Bouyer J., 2009, Modélisation et simulation des microclimats urbains : étude de l'impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments, Thèse de doctorat présentée et soutenue publiquement à l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Nantes le 16 septembre 2009.
- Clinch J., Healy J., 2000, Domestic energy efficiency in Ireland: correcting market failure, Energy Policy, 28.
- Commission Européenne, 2002, Commission Directive 2002/31/EC of 22 March 2002 implementing Council Directive 92/75/EEC with regard to energy labelling of household air-conditioners.
- Commission Européenne (CE), 2005, Directive 2005/32/EC of the European Parliament and of the Council of 6 July 2005 establishing a framework for the setting of Ecodesign requirements for energy-using products and amending council directive 92/42/EEC and directives 96/57/EC and 2000/55/EC of the European Parliament.
- Commission Européenne, 2006, Regulation N° 842/2006 of the European Parliament and of the Council of 17 May 2006 on certain fluorinated greenhouse gases.
- Direction Générale de l'Énergie et des Matières Premières (DGEMP), Août 2007, Prix du gaz et de l'électricité en Europe au 1er janvier 2007, Observatoire de l'Économie de l'Énergie et des Matières Premières.
- Iles P. et al., 2002, Labeling and other measures for heating systems in dwellings, Final technical report, Save project No. 4.1031/Z/99-283 prepared for the Commission of the European Communities.
- Insee, 2004, Enquête Points de vente 2004, Enquête Annuelle d'Entreprise Commerce 2004, disponible sur le site www.insee.fr - Thèmes : commerce de détail.
- ISO, Norme ISO 15686-5:2008, Juin 2008, Bâtiments et biens immobiliers construits - Prévision de la durée de vie - Partie 5 : approche en coût global.
- Kolokotroni M., Giannitsaris I., Watkins R., 2006, The effect of the London urban heat island on building summer cooling demand and night ventilation strategies, Solar Energy 80, 383-392.
- Lebègue D., Hirtzman P., Baumstark L., 2005, Le prix du temps et la décision publique. Révision du taux d'actualisation public, Rapport du groupe d'experts présidé par Daniel Lebègue pour le Commissariat Général du Plan.
- Macneil M.A., Letschert V.E, 2007, Future air conditioning energy consumption in developing countries and what can be done about it: the potential of efficiency in the residential sector, ECEEE 2007 Summer Study.
- Mettetal L., août 2009, La facture énergétique des ménages franciliens, Note rapide sur l'habitat, N° 485.
- Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de l'aménagement du territoire (Meeddat), 2009, Observations et statistiques, prix des énergies, <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr>.

- Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique (ONERC), septembre 2009, Evaluation du coût des impacts du changement climatique et de l'adaptation en France, Rapport de la deuxième phase.
- République Française (RF), 2007, Arrêté du 3 mai 2007 relatif aux caractéristiques thermiques et à la performance énergétique des bâtiments existants, Journal Officiel du 17 mai 2007.
- République Française (RF), 2009, Décret n° 2009-1707 du 30 décembre 2009 authentifiant les chiffres des populations de métropole, des départements d'outre-mer, de Saint-Barthélemy, de Saint-Martin et de Saint-Pierre-et-Miquelon, journal officiel de la république française.
- Réseau de Transport d'Electricité (RTE), 2008, Statistiques de l'Energie Electrique en France 2008.
- Sailor, D. J., Pavlova, A. A., 2003, Air conditioning market saturation and long-term response of residential cooling energy demand to climate change., *Energy*, Volume 28, Issue 9.
- Selten R., 2002, What is bounded rationality?, in Gigerenzer G. et Selten R., *Bounded Rationality: The adaptive toolbox*, Cambridge, Mass: MIT Press.
- Stoft S., 1995, The economics of conserved-energy « supply » curves, working papers series of the Program on Workable Energy Regulation (POWER), University of California Energy Institute.

Annexes

Table des matières

ANNEXES	289
TABLE DES MATIERES	291
ANNEXE 1 « ENVIRONMENTAL IMPACT AND DISCOMFORT RELIEF OF SUMMER COMFORT APPLIANCES »	293
ANNEXE 2 SCENARIOS (OCCUPATION, VENTILATION, EQUIPEMENTS) UTILISES POUR LES PIECES DE REFERENCE DU CHAPITRE 3	301
ANNEXE 3 PRESENTATION DES MODELES DE CLIMATISEUR UTILISES DANS LE CHAPITRE 4	303
ANNEXE 4 «STRATEGIES FOR REDUCING ENVIRONMENTAL IMPACTS OF ROOM AIR CONDITIONERS IN EUROPE»	305

Annexe 1 « Environmental impact and discomfort relief of summer comfort appliances »¹⁶⁰

SUMMARY

Thermal comfort has always been an ambiguous concept. Any public policy has to understand and respect first the functionalities demanded by the user for equipment and space, and establish the link between those expectations and environmental objectives. Premature judgment would lead to problems when coming to public policies aiming to regulate HVAC.

Using fans and moving air in a room is a way people may choose to improve their individual Summer comfort. This study characterized the benefits of comfort fans in term of comfort in summer and investigated if comfort fans could be a real alternative to compressor based systems in France.

By using experimental measurements of air speed along with building simulations with free temperature and humidity evolution, it was made possible to access inside climatic conditions when using a comfort fan. An optimized approach was then defined to describe comfort fan operating and compute the electric consumption. For the purpose of assessing the benefits of fans in terms of comfort and comparing it to air conditioners, a discomfort index based on Fanger indices was defined. It appeared that occupants using comfort fans would face about 10% of discomfort hours during occupation and that comfort fans can suppress about 60% of discomfort by consuming four times less energy than a split system.

INTRODUCTION

In Europe, some environmental agencies and associations consider compressor based air conditioning as useless energy consuming appliances and promote environmentally friendly cooling products without compressors. Considering that public policies have to understand and respect first the functionalities demanded by the user for equipment and space, and establish the link between those expectations and environmental objectives, this study aims to characterize the benefits in term of summer comfort of the air movement created by a comfort fan in French climates. The conditions in which ventilation can provide a reliable level of comfort and can be an alternative to compressor based cooling systems are investigated. After defining and presenting general concepts of comfort fans, a literature review is proposed regarding fans, comfort and energy savings.

Comfort fans

Using fans and moving air in a room is a way people can choose to improve their individual summer comfort. Air moving appliances aiming at cooling people like desk fans, pedestal fans or ceiling fans will be called “comfort fans” in this study. By generating air movement close to the body, comfort fans increase convection and evaporation and by this way individual summer comfort without lowering the room temperature. In fact, the inside temperature is even likely to increase since the comfort fan motor generates heat.

Comfort fans and thermal comfort

Numerous human thermal comfort studies have been carried out to analyze and quantify the positive and negative effects on thermal comfort of air flows and in particular of airflow due to comfort fans. As in ASHRAE standards [1], thermal consequences of air movement in cold ambiances that cause drafts and local discomfort have been often emphasized. This does not form a part of this study which aims at evincing the potential cooling benefits of air flows in Summer conditions, assuming the local discomfort is avoided.

First of all, potential cooling benefits of air flow in summer are presented in several standards. In the ASHRAE and ISO standards [1] [2], the summer thermal comfort zone is extended by increasing the air speed. For instance, the 2004 ASHRAE standard proposes, in summer conditions, to relate the comfort temperature to the air speed and the difference between the mean radiant temperature and ambient temperature [1]. However, air speed is reduced to very low level (0.8 m/s) in order to avoid disturbance like paper flying and drafts and the elevation of air speed must be adjustable and controlled by affected occupants. This kind of approach consisting in expressing the cooling sensation (temperature rise in °C) of uniform air flow according to the air speed can also be found in many research works like for example those of Szokolay [3].

All this is based on comfort indices developed by Fanger [4]: the PMV (“Predicted Mean Vote”) and the PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied). These indices mainly depend on six parameters, four ambiance ones (air temperature, mean radiant temperature, air velocity, relative humidity) and two concerning people (physical activity, clothing thermal resistance). In order to predict thermal sensations, Fanger assumed that, in comfort

¹⁶⁰ Grignon-Massé L., Adnot J., Rivière P., 2007, Environmental impact and discomfort relief of summer comfort appliances, 9th REHVA World Congress Clima 2007, 10-14 June 2007, Helsinki.

conditions, the human thermal balance must be null which leads to a first formula. It means that the individual exactly loses the heat produced by the metabolism. In addition, Fanger realized experiments in climate chambers to correlate metabolism with mean skin temperature and sweating. In more details, the PMV equation assumes that deviations from the human thermal balance vary with thermal comfort vote. A PMV equal to zero represents the optimum comfort when the thermal balance is null and this index can vary from -3 (cold) to 3 (hot). It is also possible to predict the reaction of individuals thanks to the PPD index that aims at calculating the expected number of thermally dissatisfied people in a group according to the PMV. PMV and PPD are used in several standards where comfort zones are often defined by limiting the PMV between -1 and 1 (ie less than 10% of unsatisfied people according to the PPD). In a further study [5], Fanger stated that the quantitative influence of air velocity is in good agreement with PMV and PPD equations.

Regarding comfort fans whose air flow is not uniform several studies have been carried out based on human experiments. Arens [6] showed that the cooling effect of personally controlled fans was approximately 1°C by 0.1 m/s increment of air speed. This study was carried out under specific factors, mainly air temperature from 24°C to 31°C , activity level of 1.2met (sitting in activity) and clothing equivalent to 0.5clo (summer light clothes). Furthermore, Arens [6] compared his results from experiments to results obtained with Fanger's indexes and found that they were close with a 5% difference. Effects of ceiling fans on the summer comfort zone have also been studied by Roshles [7] in experiments gathering eight subjects. They considered that air movement was pleasant up to 1 m/s at 29.5°C and the turbulence of the flow was a beneficial aspect. A study carried out by Konz [8] aimed at comparing fixed fans with oscillating fans. The exposed subjects preferred oscillating fans to fixed ones. A second set of experiments consisted in exposing the subjects to air movements at different angles to the front of the body. It appeared that angle was not a significant parameter in terms of thermal comfort. Another documented effect of air movement is the human response to the power spectrum of the turbulent airflow provided by a comfort fan. In fact, like other receptors contained in the skin, heat receptors are sensitive to some stimulation frequency ranges and have peak response at certain frequencies. Thus, Oelsen [9] determined that human thermal receptors had a significant peak in response around 0.5 Hz in cool ambiances and related velocities at a 0.5 Hz gust frequency to equivalent uniform air speed for identical cooling sensations (discomfort in this case). For example, a mean air speed of 0.4 m/s at a 0.5 Hz frequency will provide the same cooling sensation as a uniform airflow of 0.6 m/s . This kind of experiments has been also processed in hot ambiances where the human thermal response to the cooling sensation of air movement has a significant peak around 0.4 Hz [10].

Comfort fans and energy savings

In the United States, efforts are triggered off to quantify the potential energy savings of comfort fans (mainly ceiling fans) and try to improve their efficiency. Regarding energy savings, simulation studies have demonstrated that using ceiling fans can lead to energy savings or wasting in comparison with air conditioners according to set point chosen by end-users. For example, according to James [11], using ceiling fans combined with raising a home's temperature 1.1°C (2°F) will generate about a 14% net savings in annual cooling energy use (subtracting out the ceiling fan energy and accounting for internally released heat). This savings drops to 2.6% with a 0.56°C increase in set point and to a negative 3.7% savings with only a 0.28°C increase in set point. If the thermostat is not adjusted at all for fan use, cooling energy use may increase by 15%. Comfort fans can theoretically extend the natural ventilation season when the air conditioner is not used, allow for higher thermostat set points when the air conditioner is used and therefore should lead to energy savings. However, James [11] mentions that a survey of 400 households in Florida does not indicate cooling energy savings due to ceiling fans because of inappropriate thermostat settings. It was not investigated if this result could be explained by an insufficient level of comfort provided by ceiling fans. Regarding the improvement of fan efficiencies, ceiling fans have been already studied. For example, Schmidt [12] and Parker [13] have presented new designs of ceiling fans based on the improvement of motor and blade efficiencies.

METHODS

This study aims at assessing comfort benefits and electrical consumption of air moving devices and comparing them to other cooling appliances. From the bibliography previously presented, Fanger's indices (PPD and PMV) appear very relevant to assess the global thermal feeling (without drafts and asymmetries) of individuals and notably to take into account air movement benefits. These indices require a full knowledge of indoor conditions along with information regarding people like clothing or metabolic rates. As a result, the first step consists in simulating a house to define typical indoor conditions. Several sets of simulations have been carried out with different climates and different appliances. Available typical indoor conditions along with characteristics of appliances are treated with Matlab in order to provide the PPD index and consumption all over the summer period. An approach has been defined to calculate and determine the number of discomfort and operating hours for fans.

Simulations

From characteristics of the French building stock and from information of the year 2000 regulation defining energy performance requirements for buildings, a typical house has been defined. This house is supposed to be representative of the up-to-date residential building stock. Main geometrical and thermal characteristics are described in Table 1 and Table 2. In addition, assumed occupant usages are specified (occupation profiles, lighting control, installed equipments), an examples is reported in Table 3. Occupant usages are typical of a French family and are not representative of sedentary people usages (offices, rest-homes).

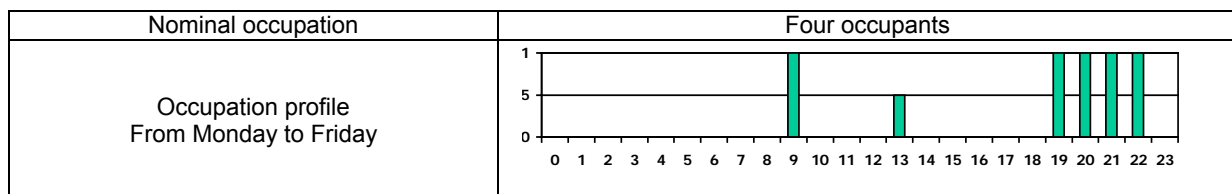
Table 1. Geometrical characteristics

Total area	136m ²
Average Height	2.5 m
Windows-to-wall ratio	7.8% of the vertical area
Living room	34m ²
Bedrooms	51m ²
Kitchen	17m ²
Lavatories	9m ²
Circulations	25 m ²

Table 2. Main thermal characteristics

Window solar factor	0.6
Light transmission rate of windows	0.6
U value for windows	2.45 W/m ² .K
U value for external walls	0.6 W/m ² .K
U value for the roof	0.25 W/m ² .K

Table 3. Example of occupant usages characteristics in the living room



This two storey residential house has been simulated first with free temperature and humidity evolution and then with an air conditioner with the ConsoClim software. ConsoClim is an energy calculation software that was developed with the aim of reducing the large amount of inputs as much as possible and using input data which are easily available by designers such as data found in manufacturer's catalogs [14]. Consoclim uses hourly weather data to compute hourly energy consumptions and hourly loads. In this study, climatic files of 1999 are used for three cities: Trappes [48.5N-2.2E]; Rennes [48.1N-1.4W]; Pau [43.1N-0.2W].

Determination of device characteristics

Airflows of a pedestal comfort fans has been measured by means of a hot-wire anemometer in a 30m² room. Since asymmetries are not taken into account in this study, only a global assessment is needed and air speed average has been computed at given distances from the fan. Some experimental values are presented in Table 4. The consumption has been set to 50 W which is the manufacturer value. It is assumed that when the fan operates, the load has to be increased by 50W due to heat production. Furthermore one comfort fan of this type can ventilate up to two occupants and therefore when a room is occupied by more than two people, additional fan is required. When assessing comfort, the potential speed interval that can be provided by this pedestal fan will be between 1.2 and 3.3 m/s. This means that occupants are located between 0.9m and 1.5m from the fan.

Table 4. Pedestal fan characteristics

Type	Distance to measurement	First speed [m/s]	Second speed [m/s]	Third speed [m/s]	Electrical input
Pedestal fan	0.9m in front	1.8	2.5	3.3	50W
	1.5m in front	1.1	1.6	2.3	50W

In France, air conditioners are often present in only one room of the house. In this study, it is presumed that a Split system is installed in the 30m² living room. This air conditioner has been sized and fills the summer load of this room (the set point is 25°C when the room is occupied). Then existing models were looked for and performances given by manufacturers were used for the simulations. As a result, characteristics are different according to the city. The EER varies from 2.63 to 3.27 that can be considered as energy efficient products in the European market. Main characteristics are given in Table 5.

Table 5. Split systems characteristics

Cities	EER	Nominal frigorific power [W]	Nominal electrical input [W]
Trappes	3.27	2750	840
Pau	2.63	3890	1480
Rennes	3.27	2750	840

Data processing

This subsection aims at explaining how to assess the comfort obtained with comfort fans and air conditioners over French cooling season in a typical French house. The PPD index is used to assess the comfort feeling. For air conditioner, a temperature set point has been chosen and the PPD is then processed for an air speed of 0.4m/s, a clothing rate of 0.7clo and a metabolic rate of 70W/m² that corresponds to a seated subject in activity or a stand subject at rest.

When it comes to calculate the PPD for the pedestal fan, the problem becomes more complicated since the provided comfort is partial and occupants are considered to adjust their clothing and fan speed to maximize the comfort feeling. An approach to reproduce occupant behaviors has been investigated and programmed with Matlab.

First of all, the PPD calculations depend on the metabolic rate that is set at 70W/m² and on several factors that are provided by building simulations with free evolutions of temperature and humidity: pressure, relative humidity, ambient temperature and mean radiant temperature.

Other remaining factors (air speed and clothing) are directly under occupant action and as a result occupant behaviors must be defined to access these values and compute the PPD index. From indoor conditions and air speed of 0.1m/s (no air moving device), the PPD is minimized by selecting the most appropriate clothes that are associated to thermal resistances. It means that occupants are assumed to look for the clothes that generate the best thermal feeling. In a second time, if the reached PPD is higher than 10%, occupants face a discomfort feeling and will try to improve it by switching on the pedestal fan. As a result, if the PPD is higher than 10%, a second minimization is computed by selecting the best fan speed (from 1.1 to 3.3m/s). This 10% value has been chosen to distinguish between comfort hours and discomfort hours because this value has been selected in standards ([1],[2]) to define the thermal comfort zone. To conclude, the obtained PPD is not necessary lower than 10% but it corresponds to the best combining between clothing and ventilating. This approach is an optimized approach since the first optimization relies on clothing and that the comfort fan is not used if a cloth modification is enough to reach a PPD lower than 10% (Figure 1).

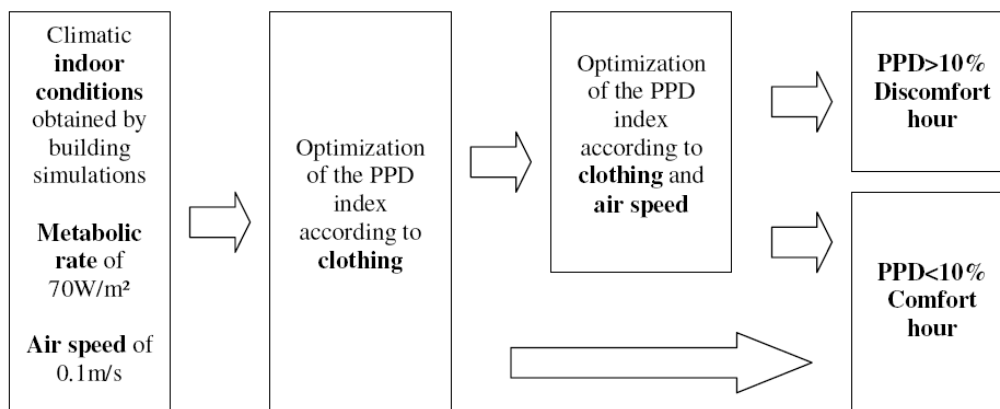


Figure 1. Approach to calculate the PPD index and determine the number of discomfort and operating hours for comfort fans

RESULTS

The typical French house previously defined has been simulated for three cities in two configurations: free evolutions of humidity and temperature and air conditioning. Results are given in this section regarding comfort assessment and consumption calculations.

Comfort assessment

As for international standards, it has been considered that the thermal comfort zone corresponds to a PPD lower than 10% ([1],[2]). Thus, a discomfort hour is defined as an hour during which the calculated PPD is higher than 10%. The number of discomfort hours has been calculated in the three cities (Trappes, Pau and Rennes) for the

two types of systems (Split system and pedestal fan) over the summer period from May to September (Figure 2a). When an air conditioner is used, there is no discomfort hour. With a comfort fan, occupants would have to face from 70 discomfort hours in Trappes to 145 in Pau, which correspond respectively to 6.4% and 13.3% of the occupation time. It is also noticed that by using a comfort fan, occupants can reduce the number of discomfort hours by more than two compared with a room without cooling device. With a comfort fan, discomfort hours depend on outdoor conditions and are more present on July and August (Figure 2b). Note that French people usually leave for holidays during these two months.

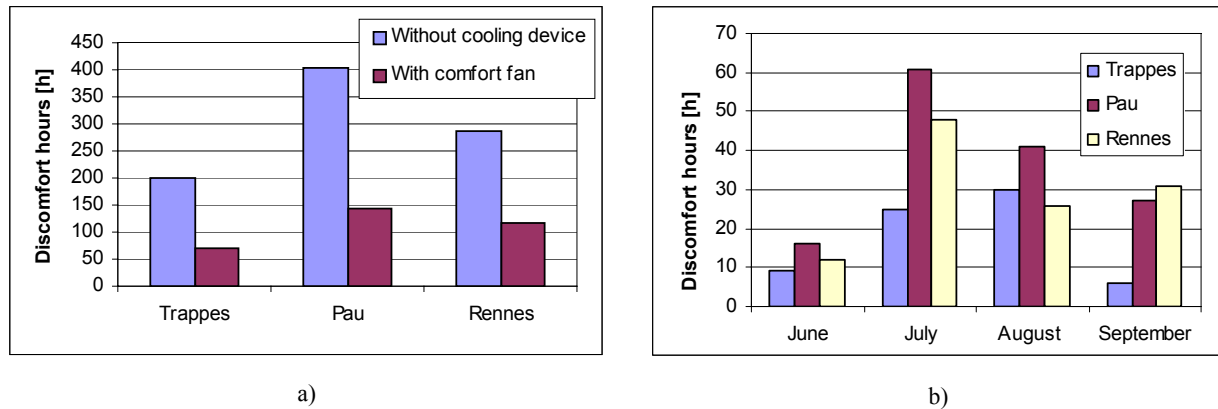


Figure 2. a) Number of discomfort hours over the summer period for every studied city, b) Number of discomfort hours every month for every studied city by using a fan

Consumption calculations

The electrical consumption that is often considered as the main environmental impact has been calculated over the summer period for both the pedestal fan and the split system in the three studied cities.

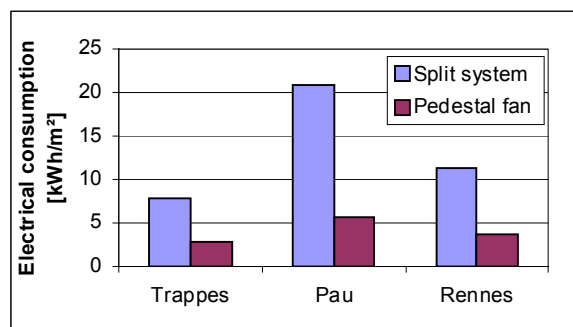


Figure 3. Electric consumptions in the studied cities

The benefits of fans in terms of cooling are very dependent on climatic conditions. It turns out that in some cases comfort fans can be considered as good alternatives to air conditioners if occupants are willing to accept some discomfort hours (less than 15% in the worst cases).

DISCUSSION

The French house previously defined has been simulated for three climates in two ways: free evolutions of humidity and temperature and air conditioning. In order to compare comfort fans to other cooling appliances, the relationship between improvement of summer comfort and consequences in terms of environmental impact is analyzed and a comfort index is proposed for this purpose. Finally, the cost of comfort is used as a second step of unification.

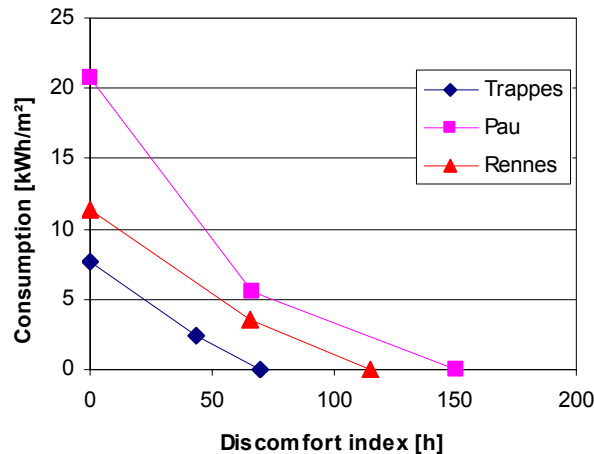
Improvement of summer comfort and consequences in terms of environmental impact

In order to state if comfort fans can be a relevant alternative to compressor based systems for cooling, an analyze of gains in terms of summer comfort and consequences in terms of environmental impact must be done. For this purpose, two different indices must be selected to assess both comfort and environmental impacts. Since the electrical consumption often appears as the main environmental impact, this will be kept as environmental index. In opposition, a unified comfort index is required to compare different cooling solutions. RAC provide total cooling by changing humidity and temperature whereas comfort fans only provide partial cooling by increasing the air speed. An index like the “discomfort degree hours” [15] cannot field this problem since with it a comfort

fan is considered as not improving comfort. As a first step of unification, it is proposed to define discomfort as the integral of PPD in respect to a reference value over the summer period (1). In this way, the number of discomfort hours is taken into account along with the amplitude of the discomfort. As for comfort standards, the reference value is fixed to 10%.

$$I = \int [PPD(t) - 0.1]^+ dt, \quad (1)$$

where PPD_{occ} is the PPD index in occupation.



This index is calculated for three configurations (split system, pedestal fan, no cooling appliance) in the three cities (Figure 4). Results are similar for the three cities, between 40% and 65% of discomfort is suppressed by using a comfort fan. An air conditioner will suppress all of it consuming around 3 or 4 times more energy than a fan.

Figure 4. Electric consumption according to the discomfort index in the three studied cities

Comfort cost

As a second step of unification, the cost of comfort has been studied. The concept, presented by Barroso-Krause [15], is based on the acknowledgement that there is a given level of discomfort below which the end-user would try to install or change a cooling system in accordance with what he can afford. As a result, it is relevant to focus on what the customer has to pay to improve comfort. A raw evaluation consists in only taking into account the purchase cost: 50€ for a fan, 1000€ for a Split system. To assess the gains in comfort, the discomfort index previously defined is used. These gains are defined by device discomfort indices normalized by the index calculated without cooling device. Results are given for the three cities and three configurations (no cooling appliance, comfort fan, air conditioner) in Table 6. Results are similar for the three cities, between 40% and 65% of discomfort is suppressed by spending 50 euros but one has to spend 1000 euros to suppress all of it.

Table 6. Costs according to comfort gains

Cooling devices	None	Comfort fan			Air conditioner
Cities	All	Trappes	Pau	Rennes	All
Gain in comfort [%]	0	37	65	43	100
Cost [€]	0	50	50	50	1000

Methods to compute environmental impact and comfort of fans have been created in such a way that at the end fan performances can be compared to a split system. It appears that occupants using comfort fans would face about 10% of discomfort hours during occupation and that comfort fans can suppress about 60% of discomfort by consuming four times less energy than a split system. In some cases, fans can be considered as good alternatives to air conditioners if occupants are willing to accept some discomfort hours. Additional simulations should be performed to analyse other cooling appliances (evaporative coolers...) and to study other sectors (office, rest-homes). The discomfort cost should also be computed in a more comprehensive way (electricity bill).

REFERENCES

- ASHRAE. 2004. ANSI/ASHRAE Standard 55-2004
- ISO. Standard 7730, 1984. Moderate Thermal Environments.
- Szokolay, S. 1998. Thermal comfort in the warm-humid tropics. Proceedings of the 31st Annual Conference of the Australian and New Zealand Architectural Science Association

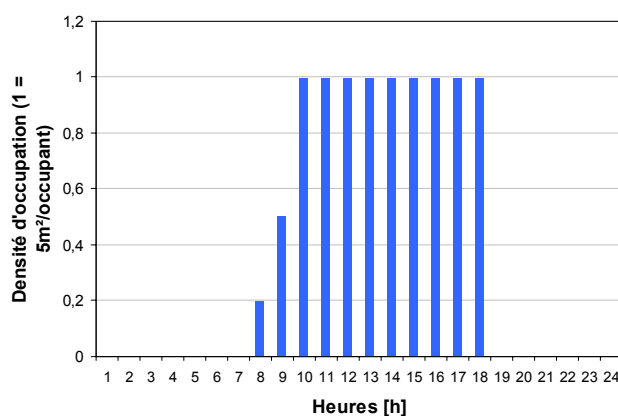
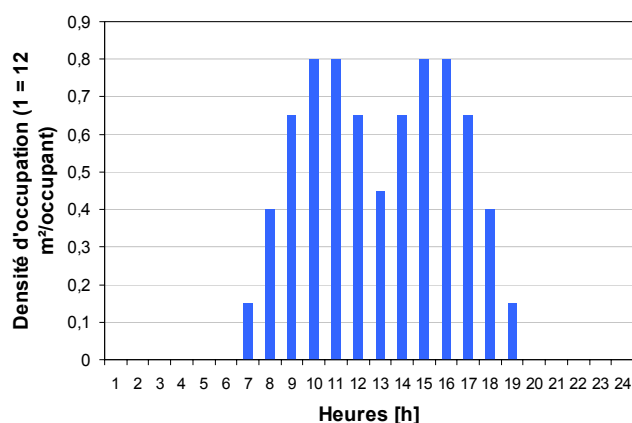
4. Fanger, P.O. 1970. Thermal Comfort. Danish Technical Press.
5. Fanger, P.O., Ostergaard J., Olesen. S., Lund Madsen T. 1974. The effect on man's comfort of a uniform air flow from different directions. ASHRAE Transactions, Vol. 80, Part 2, pp. 142-157
6. Arens E., Tengfang X., Katsuhiro M., et al 1997. A study of occupants cooling by personally controlled air movement. Energy and Buildings. Vol. 27, pp 45-59
7. Roshles, F., Konz S., and Jones. B.1983. "Ceiling fans as extenders of the summer comfort envelope." ASHRAE Transactions, Vol. 89, Part 1, pp. 245-263
8. Konz, S., Al-Wahab S., and Gough H.,1983. "The effect of air velocity on thermal comfort." Proceedings of the Human Factors society.
9. Oelsen, B. 1985. Local thermal discomfort. Bruel & Kjaer Technical Review, No.1, Denmark
10. Yizai, X, Rongyi Z, and Weiquan X. 2000. Human Thermal Sensation to Air Movement Frequency, Proceedings of the 7th International Conference on Air Distribution in Rooms (UK)
11. James, P., Sonne, J., Vieira, R. et al. 1996 "Are Energy Savings Due to Ceiling Fans Just Hot Air?" .Presented at the 1996 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings.
12. Schmidt, K., Patterson, D.J. 2001. Performance results for a high efficiency ceiling fan and comparisons with conventional fans Demand side management via small appliance efficiency.
13. Parker D., Callahan M, Sonne J, Su G. 1998.Development of a High efficiency Ceiling Fan "The Gossamer Wind"; Florida Solar Energy Center (FSEC) and AeroVironment, Inc.
14. Roujol S., Fleury E.,Marchio D. et al. 2003. Testing the energy simulation building of ConsoClim using bestest method and experimental data. 8th International IBPSA Conference
15. Barroso-Krause C. 1995.La climatisation naturelle : modélisation des objets architecturaux, aide à la conception en climat tropical. Ecole des Mines de Paris. pp 32-33

Annexe 2 Scénarios (occupation, ventilation, équipements) utilisés pour les pièces de référence du chapitre 3

Occupation

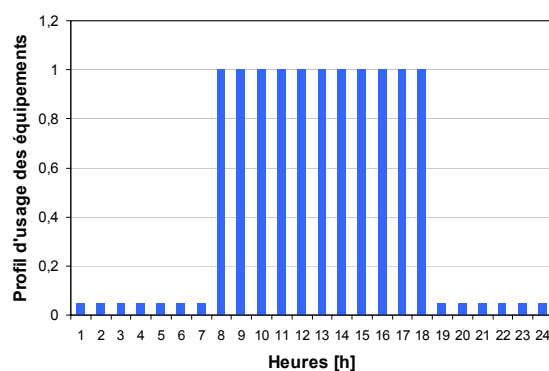
Les scénarios d'occupation des pièces de référence n'intègrent pas de périodes de vacances. Pour les bureaux, l'occupation en fonction de l'heure est donnée sur la figure de gauche.

Pour la boutique, le scénario quotidien d'occupation est donné sur la figure ci-dessous (WE compris). Pour l'appartement le scénario d'occupation de la chambre est de 2 personnes, de 11 h à 7 h.



Équipements

Dans les pièces de bureaux, le profil d'utilisation des appareils est représenté sur figure suivante en fonction de la puissance maximale installée qui est de 15 W/m². Dans l'appartement, les équipements fonctionnent lorsqu'il y a un occupant dans la pièce. Dans la boutique, les équipements (5 W/m²) fonctionnent de 8 h à 19 h.



Ventilation

Le système de ventilation mécanique fonctionne de 6 h à 20 h, du lundi au vendredi dans les bureaux, à toute heure dans les résidences, de 7 h à 20 h tous les jours dans les boutiques.

Annexe 3 Présentation des modèles de climatiseur utilisés dans le Chapitre 4

Dans le cadre du projet sur l'écoconception des climatiseurs individuels, des climatiseurs de référence, représentatifs des appareils vendus actuellement sur le marché européen, ont été définis et leurs performances énergétiques modélisées [Rivière, 2009]. Cette annexe présente cette modélisation. Il s'agit principalement de lois simplifiées d'évolution des performances avec la température extérieure et le taux de charge. Si les performances nominales des deux appareils (réversible et non réversible) diffèrent, les lois simplifiées d'évolution des performances sont identiques.

Caractéristiques principales

Les performances nominales des deux climatiseurs modélisés sont données dans le Tableau 45. Les deux appareils sont équipés d'un compresseur fonctionnant en « Tout ou Rien ».

Tableau 45. Performances nominales des deux appareils modélisés

Appareil non réversible	Puissance frigorifique	3,5 kW
	EER	2,9
Appareil réversible	Puissance frigorifique	3,5 kW
	EER	3,1
	Puissance calorifique	4 kW
	COP	3,4

Caractérisation du mode actif en refroidissement

Les puissances frigorifiques et électriques à pleine charge évoluent linéairement avec la température extérieure.

$$P_f(T_{ext}) = P_f(35) \cdot (1 - 0,0075 \cdot (T_{ext} - 35)) \quad (7)$$

$$P_e(T_{ext}) = P_e(35) \cdot (1 - 0,0143 \cdot (T_{ext} - 35)) \quad (8)$$

Avec : $P_f(T_{ext})$ puissance frigorifique à pleine charge à la température extérieure T_{ext}

$P_e(T_{ext})$ PUISSANCE ELECTRIQUE CONSOMMEE A PLEINE CHARGE A LA TEMPERATURE EXTERIEURE T_{ext}

Pour une température extérieure donnée, l'EER à charge partielle se calcule à partir de l'équation (9).

$$EER(X) = EER_{pc} \cdot (1 - 0,2 \cdot (1 - X)) \quad (9)$$

Avec : EER_{pc} est l'EER à pleine charge à la température donnée

$EER(X)$ est l'EER à la température donnée et au taux de charge X

Caractérisation du mode actif en chauffage

La puissance électrique à pleine charge évolue linéairement avec la température extérieure.

$$P_e(T_{ext}) = P_e(7) \cdot (1 + 0,0036 \cdot (T_{ext} - 7)) \quad (10)$$

Avec : $P_e(T_{ext})$ puissance électrique consommée à pleine charge à la température extérieure T_{ext}

Le système de dégivrage fonctionne lorsque la température est comprise entre -7°C et $5,5^\circ\text{C}$.

Lorsque la température extérieure est inférieure à -7°C ou supérieure à $5,5^\circ\text{C}$, la puissance calorifiques à pleine charge évolue linéairement avec la température extérieure.

$$P_c(T_{ext}) = P_c(7) \cdot (1 + 0,0214 \cdot (T_{ext} - 7)) \quad (11)$$

Avec : $P_c(T_{\text{ext}})$ puissance calorifique à pleine charge à la température extérieure T_{ext}

En raison du dégivrage, il y a une chute de la puissance calorifique à la température de 5,5 °C.

$$P_c(5,5) = 0,9 \cdot P_c(5,5^+) \quad (12)$$

Avec : $P_c(5,5)$ puissance calorifique à pleine charge à la température extérieure de 5,5 °C

$P_c(5,5^+)$ puissance calorifique calculée à partir de l'équation (11) avec $T_{\text{ext}} = 5,5$ °C

Comme indiqué par la Figure 49, la puissance calorifique à pleine charge évolue linéairement avec la température extérieure entre -7 °C et 5,5 °C.

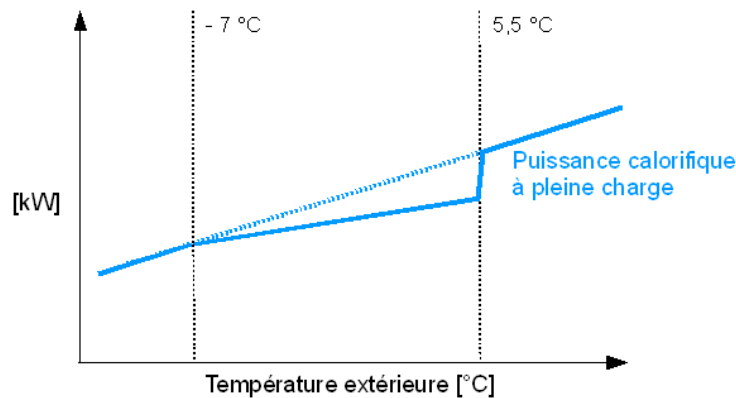


Figure 49. Evolution de la puissance calorifique en fonction de la température extérieure

Pour une température extérieure donnée, le COP à charge partielle se calcule à partir de l'équation suivante :

$$COP(X) = COP_{pc} \cdot (1 - 0,2 \cdot (1 - X)) \quad (13)$$

Avec : COP_{pc} est le COP à pleine charge à la température donnée

$COP(X)$ est le COP à la température donnée et au taux de charge X

Caractérisation des autres modes d'opération

Les puissances électriques consommées pour les modes de fonctionnement autres qu'actif sont données dans le Tableau 46.

Tableau 46. Puissances électriques consommées pour les modes de fonctionnement autres qu'actif

	Veille active	Veille passive	Eteint	Résistance de carter
Modèle non réversible	36 W	6 W	0 W	-
Modèle réversible	36 W	6 W	0 W	30 W

Références

Rivière P. et al, 2009, Preparatory study on the environmental performance of residential room conditioning appliances (airco and ventilation), disponible sur : www.ecoaircon.eu.

Annexe 4 «Strategies for reducing environmental impacts of room air conditioners in Europe»¹⁶¹

ABSTRACT

In Europe, individual air conditioners tend to equip an increasing number of buildings and constitute a fast growing electrical end-use. In 2006, they were included in the 12 first product families in the scope of the Energy using Products directive (CEC, 2005) that aims at establishing a framework for setting eco-design requirements for energy using products. In the frame of this directive, a preparatory study recommending ways to improve the environmental performance of these products has been carried out.

After analysing the European context regarding individual air conditioners, the paper reviews the main points of the preparatory study conducted for this family of products. First of all, the environmental impacts of European air conditioners are assessed using a Life Cycle Analysis approach, which enables to determine improvement paths. The following step consists in studying, both technically and economically, different improvement options aiming at reducing the environmental impacts of these appliances. These results, obtained at the product scale, are then generalised at the European level and different policy measures are defined and assessed. It appears that the implementation of a Minimum Energy Performance Standard can save up to 49 TWh and 20 MtCO₂-eq in 2020 and be economically beneficial to the European end user.

Keywords: Room air conditioners, Energy efficiency measures, Life cycle analysis

INTRODUCTION

In Europe, individual air conditioners tend to be installed in a rising number of buildings and constitute a fast growing electrical end-use. Market growth is driven by different factors among which: the diminution of purchase costs due to massive production in Asia, the increase of comfort requirements, the heat island effect (Adnot et al., 2004) and the fear of heat waves.

In 2006, room air conditioners were included in the 12 first product families in the scope of the Energy using Products (EuP) directive (CEC, 2005) that aims at establishing a framework for setting eco-design requirements for energy using products in the residential, tertiary, and industrial sectors. According to this European Directive, the first step, in considering whether and which eco-design requirements should be set for a particular product, is a preparatory study recommending ways to improve the environmental performance of this product. The preparatory studies provide the necessary information to prepare for the next phases (carried out by the European Commission) and in particular the possible draft implementing measures laying down eco-design requirements for EuPs to be voted in the Regulatory Committee by Member States.

After analysing the European context regarding individual air conditioning, this paper reviews the main points of the preparatory study carried out on individual air conditioners (Rivière et al., 2009).

The first step consists in carrying out a Life Cycle Analysis (LCA) of reference cases (i.e. products representative of the European market) in order to assess their environmental impacts and determine improvement paths. Then, different improvement options aiming at reducing the environmental impacts of these appliances are studied, both technically and economically. All this allows assessing the cost of low environmental impact air conditioners.

At the end, these results, obtained at the product scale, have been generalised at the European level. Different policy measures are defined and assessed both environmentally and economically.

¹⁶¹ Grignon-Massé L., Adnot J., Rivière P., Article soumis au journal Energy Policy le 27 janvier 2010.

1. OVERVIEW OF THE EUROPEAN SITUATION REGARDING ROOM AIR CONDITIONERS

1.1 Technical description of room air conditioners

1.1.1. What does “room air conditioner” mean?

An air conditioner is an appliance designed to maintain the temperature of indoor air at a given temperature level for a given heat load to be extracted. Individual air conditioners theoretically aim at cooling a single room and not a whole building. The simplest criterion to translate the limit of individual air conditioners is to apply a limitation in terms of cooling capacity. In Europe, the 12 kW capacity limit is already used both by the Commission (e.g. in the labelling directive (CEC, 2002a)) and by manufacturers (e.g. the Eurovent certification program (Eurovent, 2006)).

The wording “individual air conditioners” includes all the products whose cooling capacity is lower than 12 kW and covers numerous types of air conditioners sold on the European market. However the most widespread products are single-split air conditioners, multi-split air conditioners and single duct air conditioners with respectively 78 %, 10 % and 6 % of the number of individual air conditioners sold in EU 27 according to recent sales data (Hitchin and Pout, 2008).

The single-split system is composed of two packages (one indoor and one outdoor unit) connected only by a pipe that transfers the refrigerant. The indoor unit includes the evaporator and a fan, while the outdoor unit contains a compressor and a condenser. The multi-split system is similar to the previous product but includes several indoor units, each one being connected to the outdoor unit. The single duct system is a movable packaged unit that contains the compressor, the heat exchangers and the fans. The condenser ejects hot air through a duct to the exterior: air used to cool the condenser is taken inside the room and rejected outside by a duct. Operating schemes of the single-split and the single duct systems are given in Figure 1 and Figure 2.

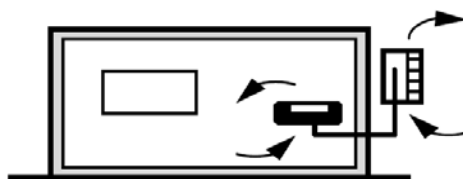


Figure 1. Operating schemes of a single-split system (Orphelin, 1999)

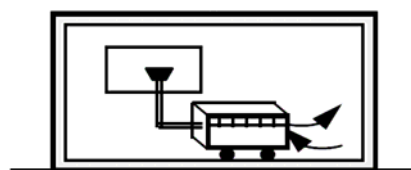


Figure 2. Operating schemes of a single-duct system (Orphelin, 1999)

All the systems may be designed as reversible. In most cases, the air conditioner operates then as a heat pump but some products are only equipped with a resistive heater. The part of reversible air conditioners increases in Europe and, for instance, more than 80 % of split air conditioners sold nowadays are reversible in countries like France, Portugal or Greece (Hitchin and Pout, 2008).

1.1.2. Some figures regarding the European market

Regarding individual air conditioners, the European market is relatively young but is growing substantially: about 3.5 million units were sold in 2005 (BSRIA, 2005) whereas only 1.6 million had been sold in 1996 (Adnot et al. 1999).

The installed stock is far from the saturation levels seen in other parts of the world (e.g. 85 % of households own at least one individual air conditioner in Japan) and the sales figures show no sign of approaching market saturation. Italy and Spain, by themselves, account for more than half of all European sales (BSRIA, 2005). In these countries, the annual additional cooling capacity is about 12.6 GW, that is, about 5 GW increase in electric peak demand with an energy efficiency ratio of 2.5.

Individual air conditioners are primarily installed in non residential buildings (offices, retails...) with 63 % of the sales (expressed in cooling capacity). About 30 % of split and multi splits are installed in new buildings, about 15-20 % are used in existing buildings for replacement; the remainder goes into existing buildings for first installation.

1.1.3. How to evaluate the Energy efficiency of air conditioners?

The energy efficiency of individual air conditioners is characterized by the Energy Efficiency Ratio (EER), defined as the ratio between the cooling power output (PC) and the cooling electric power output (PEC)(Eq. (1)). Similarly, in heating mode, the Coefficient Of Performance (COP) is defined as the ratio between the heating power output (PH) and the electric power input (PEH) (Eq. (2)).

$$EER = \frac{P_C}{P_{EC}} \quad (1)$$

$$COP = \frac{P_H}{P_{EH}} \quad (2)$$

The EER and COP depend on climatic conditions (e.g. the EER decreases when the indoor temperature decreases or when the outdoor temperature increases) and on the part load ratio (the ratio between the required cooling load and the maximum cooling load that can be extracted by the appliance).

Two ISO standards, (ISO, 1994) and (ISO, 1995) respectively for non ducted and ducted air conditioners and heat pumps, define different sets of standard temperature and humidity conditions in cooling and in heating mode to rate the performances of air conditioners that are also used in Europe. Air conditioners performances are evaluated at full capacity with the following climatic conditions:

- Cooling mode : outside air temperature of 35 °C / indoor air temperature 27 °C with wet bulb temperature of 19 °C
- Heating mode : outside air temperature 7 °C with wet bulb of 6 °C / indoor air temperature 20 °C with maximum wet bulb temperature of 15 °C

1.1.4. Energy efficiency of the European market

Two main mechanisms have been implemented in Europe in order to improve the energy efficiency of the whole market.

Since 2002, an energy label is applied to individual air conditioners (CEC, 2002). It aims at guiding the choice of potential buyers towards efficient products but does not contain any minimum efficiency requirements.

The second mechanism consists in voluntary minimum energy efficiency requirements. By participating in the Eurovent-Certification scheme, manufacturers have the right to include their products in the annual Eurovent-Certification product directory, which is widely used among consultants and installers. However, in return, they have to certify all their equipments ("Certify All" policy) and these products can be independently tested. Furthermore, a minimum EER for air conditioners is required to be certified. Thus, since 2004, products rated G, according to the Labelling Directive, were eliminated from the Eurovent Certification air conditioner programme which prevents Eurovent certified manufacturers to sell such products.

An analysis was carried out in order to compare current efficiency levels in Europe to Minimum Energy Performance Standards (MEPS) in third countries. In Figure 3, each point represents the EER value of an air conditioner (reversible or cooling only) sold in Europe. Chinese and Japanese MEPS are also plotted: products that are more efficient than these levels are allowed in these countries, less efficient products are banned. The Figure 4 only deals with reversible air conditioners and compares the Japanese MEPS to the performances of European air conditioners. The comparison is based on the average value between EER and COP. European COP and EER values come from the Eurovent-Certification public database (Eurovent, 2006).

The analysis shows that a significant part of the products sold in Europe would not comply with Japanese and Chinese legislation. To illustrate the gap, we can indicate that 90 % of the cooling only air conditioners (in the Eurovent database) do not match Japanese MEPS. Even some products, rated A in Europe, would not be allowed in Japan. This suggests that the European energy labelling is somewhat outdated.

Thereby, despite energy efficiency measures implemented in Europe like the labelling directive, the European market is significantly less efficient than in other zones. This also suggests that there is an important potential for improvement of air conditioner energy efficiency in Europe.

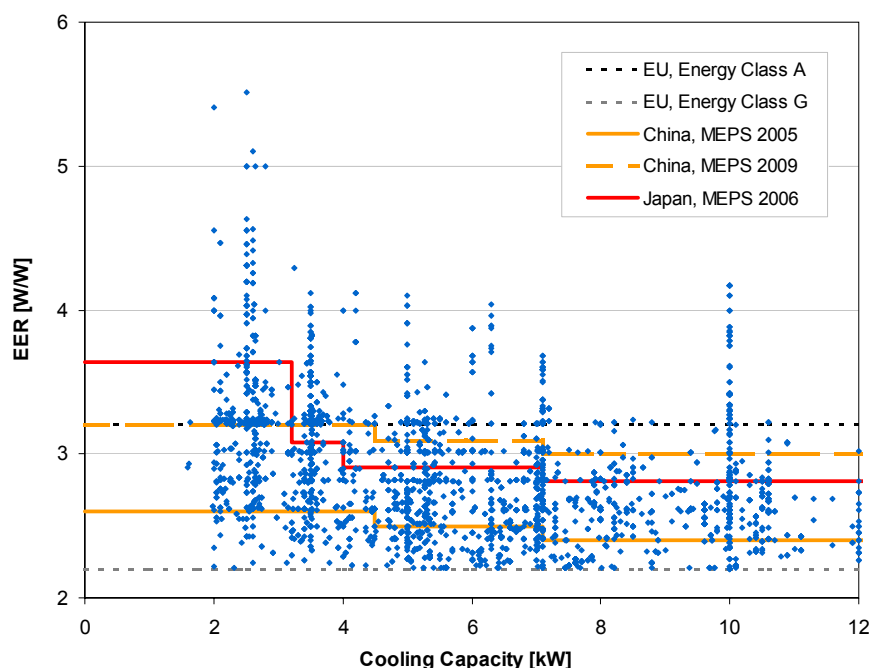


Figure 3. Comparison of the energy efficiency of European split systems in cooling mode to the Japanese and Chinese MEPS

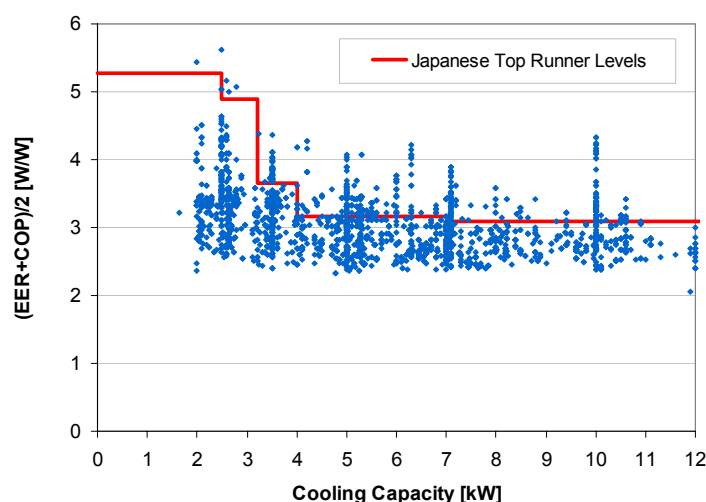


Figure 4. Comparison of the energy efficiency of European reversible air conditioners to the Japanese Top Runners levels

1.1.5. Seasonal performance metrics to rate air conditioners in Europe

Seasonal efficiency indices for air conditioners are currently being developed in Europe ((Rivière et al., 2009) and (CEC, 2009)) : the Seasonal Coefficient Of Performance (SCOP) in heating mode and the Seasonal Energy Efficiency Ratio (SEER) in cooling mode. These indices aim at including the effects of temperature and energy load variations on performance and, as a result, are likely to give a better indication of the real efficiency of products in the field than do present EER and COP figures (calculated at full load under rated conditions). In both cooling and heating modes, auxiliary power consumptions (oil heater, thermostat off, standby, off mode) are taken into account.

In what follows, seasonal efficiencies are used instead of EER and COP to evaluate the energy efficiency of air conditioners. They can be considered as the ratio between the annual cooling needs (resp. heating needs) and the annual electricity consumption.

2. LIFE CYCLE ANALYSIS OF EUROPEAN ROOM AIR CONDITIONERS

A LCA of European air conditioners is carried out in order to assess the environmental impacts and to determine improvement paths. The first step consists in characterizing reference cases, which are products representative of the European market, in terms of technical features. Based on these products, the tool developed by VHK (2005) in the frame of the Eco design directive is used to perform the LCA. This tool takes into account the different phases of the product life (production, distribution, use and end of life) to calculate the main environmental impacts: materials consumption, energy consumption, air and water emissions...

2.1. Technical description of representative products

2.1.1. Types of air conditioners kept for the study

The European market of individual air conditioners is mainly composed of three main product types: single-split systems, multi split systems and single duct systems. It appeared that there were important differences between split air conditioners whose capacity is lower than 6 kW and those whose capacity is between 6 and 12 kW (e.g. in terms of energy efficiency). On the other hand, if cooling only air conditioners and reversible ones are very similar in terms of components, their operating conditions largely differ and it is necessary to make a distinction between them.

Finally, five different base cases were kept:

- a cooling only air conditioner in the [0-6 kW] range
- a reversible air conditioner in the [0-6 kW] range
- a cooling only air conditioner in the [6-12 kW] range
- a reversible air conditioner in the [6-12 kW] range
- a single-duct air conditioner

2.1.2. Determination of technical characteristics of the base cases

The specification of the reference cases is based on databases developed by Eurovent (Eurovent, 2006). From these databases, distributions and regressions have been extracted to determine the characteristics of average models in cooperation with manufacturers (Rivière et al., 2009). The performance characteristics are presented in Table 1 for the five base cases.

Table 1. Performance characteristics of reference cases

Performance characteristics	Cooling only AC in the [0-6 kW] range	Reversible AC in the [0-6 kW] range	Cooling only AC in the [6-12 kW] range	Reversible AC in the [6-12 kW] range	Moveable air conditioner
Cooling capacity	3.5 kW	3.5 kW	7.1 kW	7.1 kW	2.2 kW
EER	2.9	3.1	2.5	2.8	2.3
Heating capacity	-	4 kW	-	8.1 kW	-
COP	-	3.4	-	3.3	-

In order to assess technical improvements, it is necessary to know accurately the technical solutions usually implemented in current products. Some of the main technical features are given in Table 2 for the five base cases, accurate descriptions are available in (Rivière et al., 2009). The evolution of performances according to outdoor climatic conditions and energy loads were also characterized, which enabled to assess the seasonal efficiencies of the base cases (Table 2).

Table 2. Main technical features of reference cases

		Cooling only [0-6 kW]	Reversible [0-6 kW]	Cooling only [6-12 kW]	Reversible [6-12 kW]	Moveable air conditioner
Working fluid	Type	R410A	R410A	R410A	R410A	R407C
	Charge	0.8 kg	1.2 kg	2 kg	2.5 kg	0.5 kg
Compressor	Type	Rotary	Rotary	Rotary	Rotary	Rotary
	Control	On/off	On/off	On/off	On/off	On/off
	Efficiency (CEN, 2006a)	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8
Evaporator (in cooling mode)	Surface (air side)	7.4 m ²	8.2 m ²	11.6 m ²	12.9 m ²	2.7 m ²
Condenser (in cooling mode)	Surface (air side)	12.0 m ²	13.3 m ²	19.6 m ²	22.6 m ²	3.2 m ²
Seasonal efficiencies	SEER	2.8	3	2.5	2.8	1.9
	SCOP	-	2.8	-	2.5	-

2.2. Collection of data required to perform the LCA

2.2.1. Production phase

Environmental impacts of the production phase mainly depend on materials (type and weight) that compose the product. We worked in cooperation with manufacturers to collect this information. Table 3 presents the composition of three reference cases. The only difference between reversible and cooling only split systems lies in the addition of a 4 way valve, a second expansion valve and copper for tubing these elements in order to enable reverse mode operation. For the two other reference split systems, the composition is the same but the total mass ratio of the product is equal to 14 kg/kW of cooling capacity.

Table 3. Simplified bills of material for three reference cases

	Weight [g]		
	Cooling only split air conditioner base case of 3.5 kW	Reversible split air conditioner base case of 3.5 kW	Moveable air conditioner base case of 2.2 kW
Plastics	8601.2	8601.2	11272.0
Ferrous metals	19821.9	19821.9	7668.3
Non-ferrous metals	10516.3	11016.3	2719.0
Electronics	1461.5	1461.5	682.2
Various other materials	5053.3	5053.3	10658.5

2.2.2. Distribution phase

Product volumes of base cases are required in order to assess transportation impacts. An analysis of available products leads to the following volumes: 0.25 m³ for the two split systems of 3.5 kW capacity, 0.5 m³ for the two split systems of 7.1 kW capacity and 0.25 m³ for the single duct. It is assumed that products are manufactured in Asia and carried to European countries by boat.

2.2.3. Use phase

It is necessary to quantify the energy and the working fluid used by every reference case. They are the only resources consumed during the use phase since, in the field, there is no replacement of components.

In active mode (i.e. when a given amount of energy must be extracted from the room), the energy consumption is due to the operation of different components (compressors, fans...). For other operation modes (stand-by, off-mode), the consumption is not null because some devices (remote

controls, screens, timers...) are still running. Several surveys were performed in New Zealand to assess the electric consumption of air conditioners in stand-by and off-mode (MCE & NZNEECS, 2006). Individual air conditioners consume about 0.2 to 100 W in both modes depending on the available functionalities.

Detailed computer building simulations were performed on an hourly basis over a year with the TRNSYS 16 software to estimate the energy consumption due to cooling and heating for six different building types (existing and new offices, existing and new flats, existing and new retails) and for every EU 27 member states (Rivière et al, 2009). The systems were sized based on peak cooling and heating loads (determined by the simulations): they are assumed to guarantee the required setpoint temperature all over the season.

Energy consumption values obtained for every country and every type of building were then weighted with 2005 sales figures (BSRIA, 2005) which enabled to determine the energy consumption per reference case given in Table 4. A distinction was made between electricity consumption in active mode and additional consumption (e.g. stand-by) which represents between 10 % and 15 % of the total consumption.

Table 4. Annual electricity consumption per unit

Energy consumption per unit/year [kWh/y]		Cooling only single split 3.5 kW	Reversible single split 3.5 kW	Cooling only single split 7.1 kW	Reversible single split 7.1 kW	Single duct 2.2 kW
Cooling mode	Compressor-on	377.5	374.0	882.6	839.7	311.1
	Additional consumptions	67.4	31.8	86.7	46.9	60.7
Heating mode	Compressor-on		957.9		1997.5	
	Additional consumptions		135.6		266	
Total per unit in kWh/y		445	1499	969	3150	372

Regarding refrigerant fluids, the leakage rate represents the amount of rejected fluid according to the initial charge. Barrault (2004) proposed average yearly emission rates for already installed products of 2 % for Single Duct systems and 5 % for split systems. A field study of leakage rates on air conditioning and refrigerating equipments was led in France (CETIM, 2004); estimates of 3.8 % were found in-situ for two split units. IPCC (2005), based on results of UNEP (2003), considers yearly emission rates of about 4-5% for split systems.

Since we were dealing with new products, we assumed a yearly leak rate of 3 % for split systems and 1 % for single duct air conditioners which are more packaged. It is assumed that the systems are not supplied with new fluids during the use phase, which corresponds to the common field practice.

2.2.4. End of life phase

There are two main issues to be dealt with regarding the end of life phase: the treatment of the working fluid and the treatment of materials.

Since this study focuses on new products, it is assumed that the Directive WEEE (CEC, 2002b) and Fgas (CEC, 2006) will be respected at the time the products are disposed. This implies that all the working fluid is recovered and that the rate of recovery is at least of 80 % of the weight of the appliance. Also, the rate of reuse and recycling of components, materials and other substances are at least of 75 % of the weight of the appliance.

However, a sensitivity study is carried out in section 3.2 to evaluate to which extent different end of life scenarios would have changed the environmental impacts.

2.3. Environmental impacts of reference cases

The LCA tool, used here, provides the environmental impact of products for many pollutants (particles, heavy metals...) but the following analysis only focuses on GHG emissions (CO₂-eq) and primary energy consumption. Comprehensive LCA results are available in (Rivière et al., 2009).

2.3.1. Impact of the different life phases

In terms of GHG emissions, Figure 5 represents emissions (in CO₂-eq) per life cycle phase for three reference cases. It appears that about 85 % of GHG emissions are linked to the energy use for moveable systems, 75 % for the cooling only air conditioner and 90 % for the reversible one. The working fluid leakages accounts for 4 % of the total emissions for moveable systems, 14 % for the cooling only air conditioner and 7 % for the reversible one. Other phases account for a very low part of total emissions: between 2 and 5 % for the production phase, about 1-2 % for the distribution phase and about 1-2 % for the end of life phase.

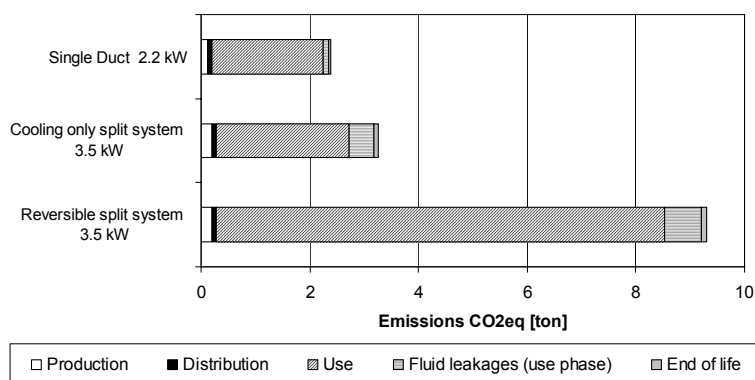


Figure 5. GHG emissions per life cycle phase for three reference cases

Regarding energy consumption, the use phase represents about 93 % of the total energy consumption for the cooling only split system and the single duct, and about 98 % for the reversible split system (Figure 6). The remaining phases account for a very low part of total emissions: between 2 and 6 % for the production phase, about 1 % for the distribution phase and less than 1 % for the end of life phase.

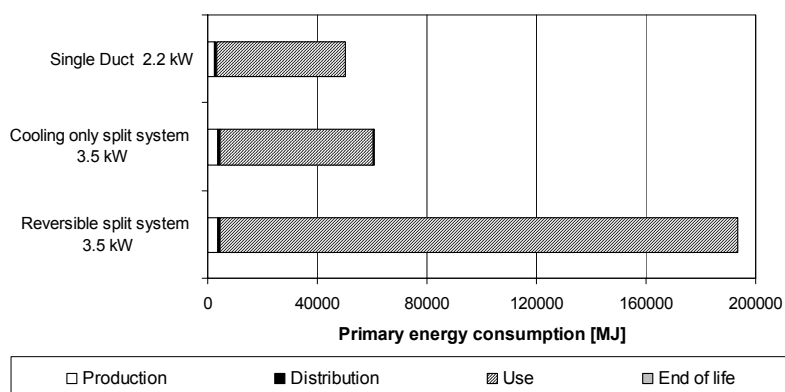


Figure 6. Primary energy consumption per life cycle phase for three reference cases

Most of environmental impacts occur during the use phase because of energy consumption and, to a lesser extent, of fluid leakage. The environmental impact of larger units does not differ much from 3.5 kW units except that, being less efficient, the predominance of the use phase is even more emphasized.

2.3.2. Sensitivity analysis on end-of-life scenarios

First of all, let's consider the issue of working fluids. The Figure 7 corresponds to the case where all the refrigerant fluid is lost at the end-of-life. This increases GHG emissions over the product life by 18 % (reversible), 33 % (cooling only) and 36% (single duct). Thus, the F-gas directive (CEC, 2006) can cut a significant amount of GHG emissions due to air conditioners and challenging actions must be carried out to respect it at the end of life.

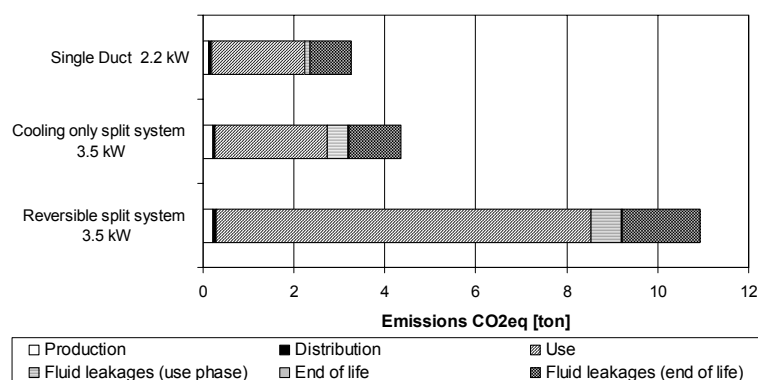


Figure 7. GHG emissions per life cycle phase for three reference cases (all the refrigerant fluid is lost at the end-of-life)

Regarding waste treatment (refrigerant fluid excluded), the influence of future scenarios is less significant. In the worst case (scenario with no waste recovery), GHG emissions and energy are increased by less than 6 %, but there can be important consequences regarding other pollutants.

2.3.3. Identified improvement paths

Five base cases were defined to represent European air conditioners. A LCA was carried out for these base cases and it appeared that the most important part of environmental impacts (GHG emissions, primary energy consumption) occurs during the use phase mainly because of energy consumption. As a result, the environmental improvement of individual air conditioners should focus on energy efficiency and, to a lesser extent, on working fluid leakages.

3. IMPROVEMENT OF ENVIRONMENTAL PERFORMANCES AT THE PRODUCT SCALE

This section aims at studying, both technically and economically, different options to reduce the environmental impacts of room air conditioners. The economical assessment is based on a Life Cycle Cost (LCC) approach, adopting the point of view of the end-user.

3.1. Life cycle costs of reference cases

3.1.1. Installation and acquisition costs

National average product prices (moveable and split systems) have been gathered from market research reports (BSRIA, 2005) in Table 5. The documented countries represent about 80 % of the current market of individual air conditioners. These prices refer to the price of the whole system, recorded at the first point of distribution. They therefore represent manufacturers' selling prices (with possible discounts from list prices) including ancillaries, such as controls, where applicable. If no difference between reversible and cooling only appliances has been noticed, the discrepancy between countries is high (there is a ratio of about 3). In order to characterize base cases in terms of cost, the average prices of 177 €/kW for moveable systems and 195 €/kW for split systems are kept.

Table 5. Average product prices for ten EU member states, in euro per unit and in € per kW of cooling capacity

		GR	FR	SP	IT	DE	PT	UK	CZ	H	PL
Cost [€/unit]	Movables	872	545	484	471	566	695	382	335	596	335
	Single-split	493	1030	652	712	1216	847	449	570	600	530
Cost [€/kW]	Movables	423	202	179	174	210	258	141	124	221	124
	Single-split	141	294	186	204	347	242	128	163	171	151

3.1.2. Life cycle costs

The Life Cycle Costs (LCC) include the appliance purchase price but also the running costs (energy, repairs...) discounted over the product life.

The product life is assumed to be 12 years for all types of air conditioners and the discount rate is set at 2 %.

Regarding energy prices, an average electricity price at 0.145 euro/kWh is kept for all Europe and all sectors. In order to take into account energy prices evolution, a long term electricity price increase of 1.5 % yearly is included. Over a product life of 12 years, this leads to an average electricity price of 0.158 €/kWh.

According to standard EN 15459 (CEN, 2006b) annual preventative maintenance including operation, repair and servicing costs for air conditioners are typically 4 % of the initial investment (including installation costs). In the absence of more information on maintenance costs, this value was kept for the calculations.

The Life Cycle Costs are given in Table 6 for the 5 base cases. For reversible split and single duct units, the main cost for the end-user is the energy (electricity) cost that represents between 1 and 4 times the purchase price. For cooling only split units, energy only represents about 30 % of the total life cycle cost. The standard hypothesis for maintenance (4 % of purchase and installation price) leads also to high maintenance costs to the end user for split units (about 20 % of the LCC).

Table 6. Life Cycle Cost of reference cases

	Cooling only single split 3.5 kW	Reversible single split 3.5 kW	Cooling only single split 7.1 kW	Reversible single split 7.1 kW	Single duct 2.2 kW
Product price [€]	683	683	1385	1385	389
Installation, acquisition costs [€]	1000	1000	1000	1000	0
Electricity [€]	647	2781	1471	5799	582
Repair/maintenance costs [€]	712	712	1009	1009	165
Total [€]	3042	5176	4865	9193	1136

3.2. Economical and technical evaluation of improvement actions

3.2.1. Replacement of the working fluid

The replacement of the working fluid (R410A by CO₂) was studied by Rivière et al. (2009): it reduces direct emissions but can increase energy consumption. Being a non mature technology, present research studies (Ortiz, 2003), (Jakobsen, 2006) are conflicting and do not enable to conclude about its relevance. As a result, it was decided to focus on improving the energy efficiency (use phase) of units operating with R410A.

3.2.2. Evaluation of energy efficiency improvement actions

A portfolio of improvement actions was defined. These actions mainly consist in improving the energy efficiency or the control of some components (compressor, fans...), increasing heat exchanger surfaces and reducing stand-by power consumptions.

These actions were applied to all the reference cases by performing simulations with the Heat Pump Design Model, Mark 7 Version (DOE/ORNL, 2009). The improvement due to selected actions is assessed by calculating seasonal performance efficiencies.

In order to establish the overcost of improvement options, a so-called “flat margin” model is adopted: manufacturer overcosts are directly passed to the final end-user with intermediary multiplication factors from manufacturer cost to manufacturer selling price and VAT. The average cost structure was identified thanks to information supplied by manufacturers (Rivière et al., 2009). A constant installation price is kept for split systems whatever the performance.

Once all the options have been simulated, the seasonal performance indices allowed assessing the energy consumption of improved reference cases. Using the same cost hypothesis than for the calculation of base cases LCC (Section 3.1), LCC were calculated for all individual options and the payback time was used to classify the options by order of merit. The more expensive options relate to heat exchanger area increase and the most economically efficient ones consist in improving efficiency and control of compressors. Regarding the reduction of stand-by electric consumptions, improvement over the base case level would also be cost effective even if not of first priority.

The individual options are then implemented from the most (economically) efficient ones to the less efficient ones. This means that an option is implemented when all the more efficient ones have been implemented. Interactions in terms of overcosts and energy efficiency are taken into account to avoid double counting. This enables to assess the evolution of seasonal performance indexes according to the purchase price (Figure 8 and Figure 9 for split units).

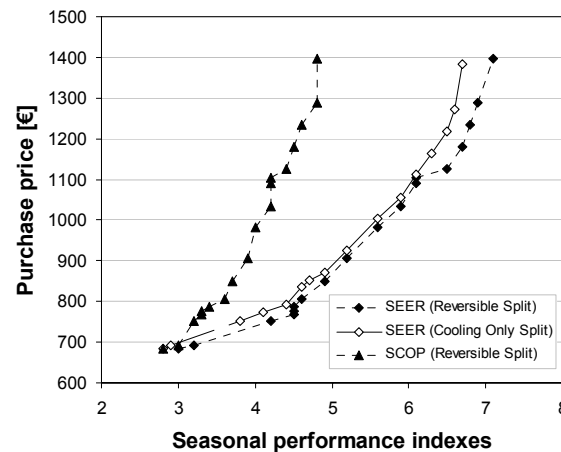


Figure 8. Price according to seasonal performance indexes for the 3.5 kW split units

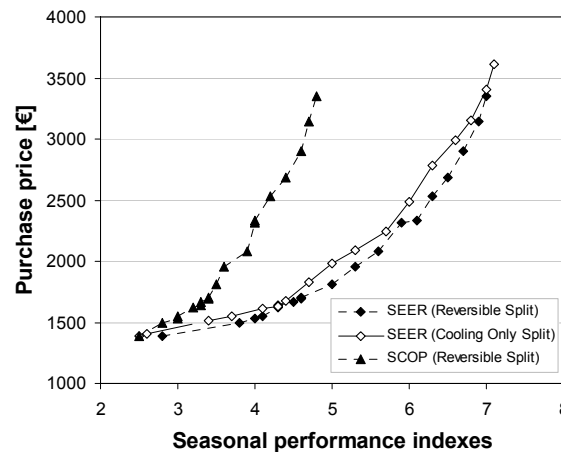


Figure 9. Price according to seasonal performance indexes for the 7.1 kW split units

Given the unavoidable uncertainties when dealing with economic data, we decided to compare our results with available data on other markets (Figure 10). The prices of split air conditioners representative of the EU market on 2007 have been estimated ((Hitchin, 2007) completed with internet offers for high efficiency products). Ellis (2007) analysed the prices of air conditioners in China and in Japan and collected data in Japanese points of selling, and from internet shopping in China. Two curves are derived from this study. The first one is the aggregate of all the prices collected within this study, the second one shows these same values but corrected by the purchase decrease because of less additional functions (e.g. air purifier). This last curve is therefore more likely to capture the cost of energy efficiency.

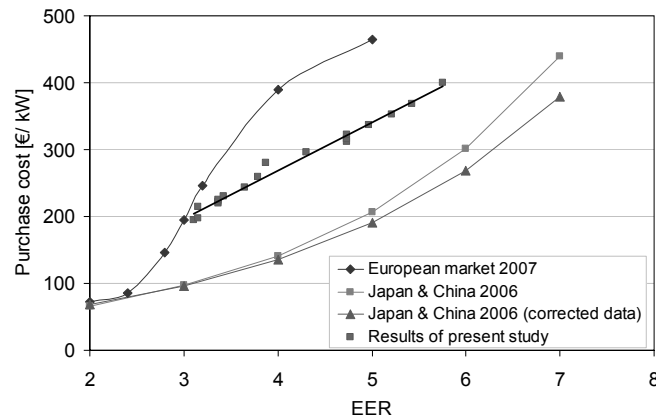


Figure 10. Evolution of prices according to air conditioner EER : results of this study and data observed on existing markets

The shape of the curve obtained within our study is comparable to the cost evolution observable for Asian markets. As a result, it seems that we succeeded in capturing the overcost of energy efficiency.

However, this study seems, on the one hand, to under-estimate the prices found on the European market and, on the other hand, to over-estimate those met on Asian markets. In average, low efficiency products are introduced on the EU market at similar prices than on Asian markets but high efficient products are significantly more expensive. For models whose EER is higher than 3, there is a price increase of more than 100 % for the European end-user. This is probably a consequence of profit margins applied by Asian manufacturers.

In the close future, with higher energy performance standards in Europe, low efficiency products will disappear and the competition will take place on efficient products. Given the difference between current European prices and Asian ones, this should contribute to decrease the prices of efficient air conditioners in Europe.

As a result, if our study seems to under-estimate the prices met in the European market, the observation of Asian market suggests that prices are likely to decrease in Europe, catching up to our estimates. For the end user, this evolution is likely to end up with a double gain, maintained or lower product prices and higher energy efficiency levels.

3.3. Life Cycle Costs of improved base cases

Using the same cost hypotheses as for the calculation of reference case LCC (Section 3.1), it is now possible to evaluate the LCC of improved reference cases.

For instance, the LCC-curve is drawn for the reversible split of 3.5 kW on Figure 11. The Least Life Cycle Cost (LLCC) point, the Best Available Technology (BAT) point and the reference case point are placed on the curve. The shape of the curve is due to the fact that the more efficient is the appliance, the higher is the purchase price but the lower is the electricity bill.

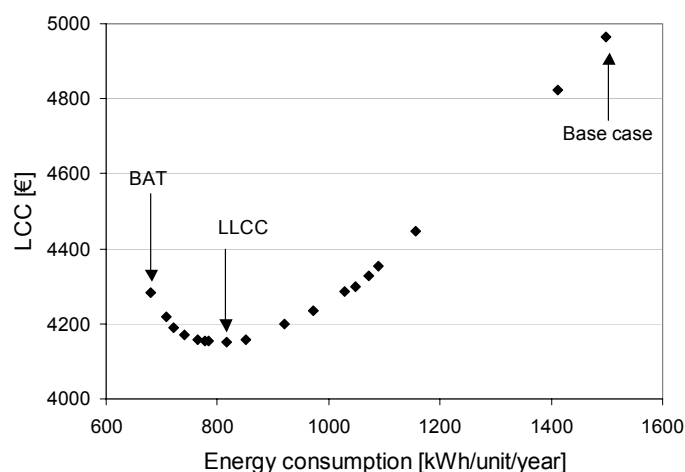


Figure 11. LCC curve for the reversible split (3.5 kW)

The Least Life Cycle Cost point and the Best Available Technology point are summarized in Table 7 for all the base cases. It appears that the most economical units for the end-user (LLCC) are about 80 % more efficient than the reference cases (up to 230 % for the Single Duct). Since the lifetime is 12 years, even the BAT is beneficial to the end-user for single duct and reversible units. Significant savings are therefore possible at a negative cost for the end-user.

Table 7. Base cases, LLCC and BAT levels

	Base cases		LLCC			BAT		
	SEER	SCOP	SEER	SCOP	Payback time [y]	SEER	SCOP	Payback time [y]
CO – 3.5 kW	2.5	-	4	-	3.8	6.1	-	16.3
Rev – 3.5 kW	2.6	2.3	5.4	4	3.3	6.5	4.8	5.5
CO – 7.1 kW	2.3	-	4	-	3.8	6.4	-	22.5
Rev – 7.1 kW	2.6	2.2	5.3	4	3.1	6.5	4.9	7.1
Single Duct	1.7	-	4	-	4	5.9	-	10.9

4. STUDY OF DIFFERENT POLICY MEASURES AIMING AT REDUCING ENERGY CONSUMPTION AND GHG EMISSIONS DUE TO ROOM AIR CONDITIONERS IN EUROPE

The results presented in section 3 show that a more efficient market would be beneficial to the whole society in terms of environmental impacts and to the end-user in terms of costs. In this section, these results are generalised at the European level by studying, both environmentally and economically, different policy measures.

4.1. The Business As Usual scenario

The market model developed to generate projected sales and stocks of individual air conditioning product is described by Pout and Hitchin (2009).

The BAU scenario includes the energy efficient improvements due to the rapid increase of the penetration of variable speed compressor (100 % penetration ratio in 2012) for split units. In addition, it is assumed that little progress is made in terms of full load energy efficiency for split units (following long term increase on the time period from 1996 to 2006). No progress in efficiency is expected for single duct units in the BAU scenario as competition is based on the purchase price.

The BAU scenario leads to the repartition of products sold in 2006, 2010, 2015 and 2020 shown on Figure 12 and Figure 13 (efficiency classes are defined in Table 8). Both in cooling and heating, an important change in statistical efficiency distribution occurs between 2006 and 2015 thanks to the full

penetration of inverter driven compressors in split units. For the cooling mode, this leads to an important spread of units' performances because of the persistence of on-off controlled Single Duct units.

Table 8. Proposed energy classes

Energy classes	SEER	SCOP
A3	$6.8 \leq \text{SEER}$	$4.6 \leq \text{SCOP}$
A2	$5.7 \leq \text{SEER} < 6.8$	$4.0 \leq \text{SCOP} < 4.6$
A1	$4.6 \leq \text{SEER} < 5.7$	$3.4 \leq \text{SCOP} < 4.0$
A	$4.0 \leq \text{SEER} < 4.6$	$3.1 \leq \text{SCOP} < 3.4$
B	$3.4 \leq \text{SEER} < 4.0$	$2.8 \leq \text{SCOP} < 3.1$
C	$2.8 \leq \text{SEER} < 3.4$	$2.5 \leq \text{SCOP} < 2.8$
D	$2.4 \leq \text{SEER} < 2.8$	$2.2 \leq \text{SCOP} < 2.5$
E	$2.0 \leq \text{SEER} < 2.4$	$1.9 \leq \text{SCOP} < 2.2$
F	$\text{SEER} < 2.0$	$\text{SCOP} < 1.9$

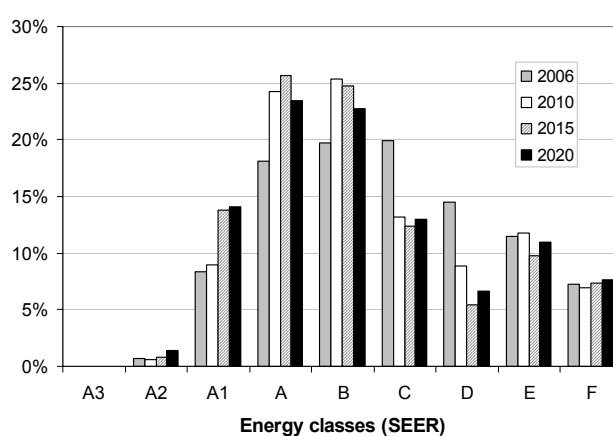


Figure 12. Distribution of reversible and cooling only air conditioners according to their energy class ("BAU scenario")

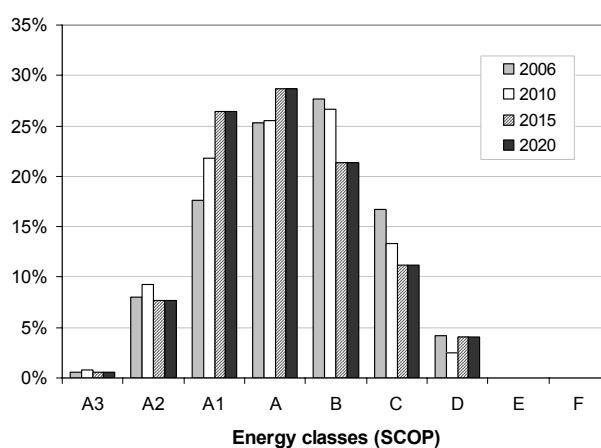


Figure 13. Distribution of reversible air conditioners according to their energy class ("BAU scenario")

4.2. Description of considered energy efficiency measures

Two levels of Minimum Energy Performance Standards (MEPS) are considered in this section: banning of energy efficiency classes B-F in cooling and in heating mode and banning of energy efficiency classes A-F in cooling and in heating mode.

Three scenarios are studied which differ in terms of MEPS stringency and timings (Table 9).

Table 9. MEPS and timing assumed in the three scenarios

Measures	Scenarios		
	"MEPS 2015"	"MEPS LLCC"	"MEPS 2012"
Ban B-F	2015	2013	2012
Ban A-F	-	-	2018

In the "MEPS 2015" scenario, the MEPS levels are set to ensure the complete transition of the sales towards inverter driven units; this scenario is seen as an accompanying measure of an already observed trend.

In the "LLCC" scenario, the MEPS levels are set to LLCC levels in 2013. Because the primary functionality of air conditioner is cooling, this LLCC was calculated by taking into account the summer season and not the whole year. If the whole year had been considered, the LLCC for heat pumps would have reached more stringent MEPS levels.

In the "MEPS 2012" scenario, MEPS are applied in 2012 and a second set of requirements is taken in 2018. In 2012, it is estimated that the share of compliant units before the MEPS application would be around 30 % for the SEER threshold and 60 % for the SCOP one.

The Table 10 presents the planned evolution of the average sales of SEER and SCOP for the different scenarios.

Table 10. Planned evolution of average SEER and SCOP of sold products according to the scenario

		1990	2005	2015	2025
BAU	SEER	2.1	3.0	3.4	3.3
	SCOP	2.4	2.8	3.1	3.1
MEPS 2015	SEER	2.1	3.0	4.3	4.3
	SCOP	2.4	2.8	3.3	3.3
LLCC	SEER	2.1	3.0	4.3	4.5
	SCOP	2.4	2.8	3.5	3.6
MEPS 2012	SEER	2.1	3.0	4.5	5.2
	SCOP	2.4	2.8	3.7	4.1

4.3. Environmental impact

In addition to the evolution of appliances efficiency, some heating and cooling trends are also taken into account which are due to the evolution of the building stock: new buildings (to be understood here as building constructed after 2005) enter the stock progressively; the refurbishment rate is of 2 % yearly for commercial buildings (office and trade) and of 1 % in the residential sector.

Without any information about the use of reversible air conditioners in the real life, it was assumed that they are all used in heating mode. The reality is probably different. When an air conditioner is installed in an existing building for example, there is already a heating system that occupants can still use. In some cases, reversible air conditioners are bought to avoid summer discomfort periods and are not used in winter. Generally speaking, reversible air conditioners are likely to be used in heating mode in countries where the winter is mild and the electricity is cheap. Thus, the results presented here in terms of energy savings and CO₂ mitigation are upper bounds of what can be effectively expected in the field.

The electricity consumption and CO₂ emissions due to the stock of air conditioners and heat pumps are presented respectively on Figure 14 and Figure 15. The main part of electricity consumption (and CO₂ emissions) occurs in winter. We see on Figure 14 that, in 2010 and according to the BAU scenario, the electricity consumption due to air conditioners will reach 94 TWh, 63 of which being due to heating. This represents about 2-3 % of the current electricity consumption in EU 27. This scenario forecasts a 80 % increase of electricity consumption due to room air conditioners between 2010 and 2025.

As shown on Figure 14, energy savings in 2020 range from 21 TWh for the “2015 MEPS” scenario to 49 TWh for the “2012 MEPS” scenario. Regarding GHG emissions, this corresponds to respectively 9 MtCO₂eq and 20 MtCO₂eq. In 2020, the most stringent scenario can allow to decrease the electricity consumption and the GHG emissions by respectively 30 and 16 % compared to the BAU scenario.

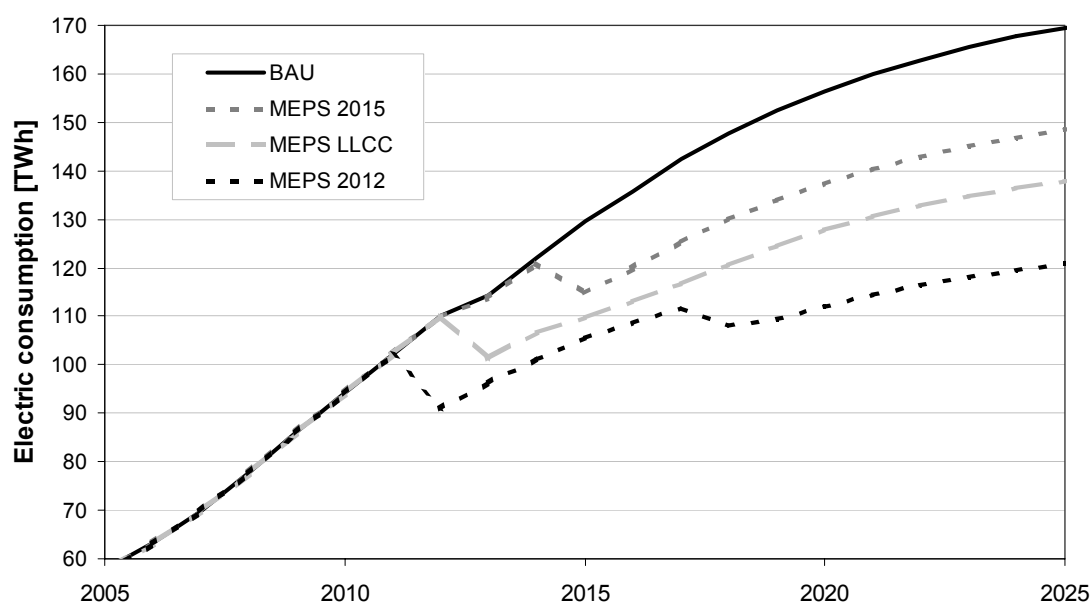


Figure 14. Total EU 27 electric consumption (use phase) for the different scenarios

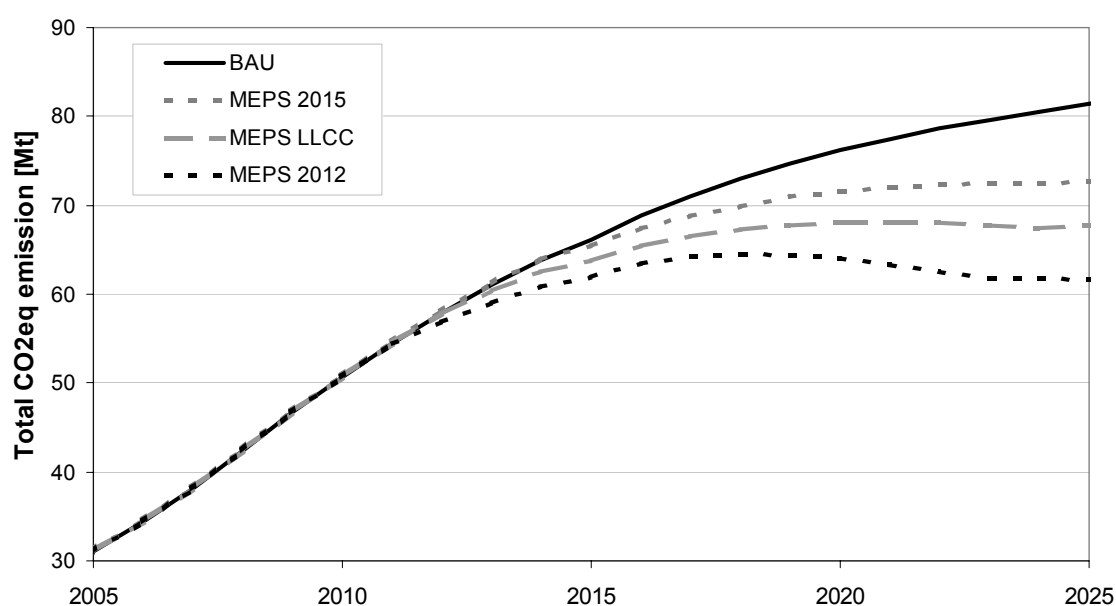


Figure 15. Total EU 27 CO₂eq emissions for the different scenarios (energy use and refrigerant leaks)

4.4. Economic impact

The evolution, over years, of average purchase prices and LCC of air conditioners are reported for the BAU scenario in Table 11. The average purchase price of reversible air conditioners increases because the BAU scenario includes energy efficiency improvement trends. Regarding cooling only air conditioners, after 2010, the market is mainly composed of single duct units because the trend is

towards the generalization of reversibility among split systems. This explains that the average purchase price and average LCC of cooling only air conditioners decrease in 2015 (Table 11).

Table 11 also compares every scenario to the BAU scenario in terms of average purchase prices and LCC. All the scenarios are, on average, beneficial to the end-user on a LCC basis. The most stringent scenario is even the most beneficial for reversible air conditioner users. This is due to the fact that the LLCC was calculated by taking into account the summer season and not the whole year as in the studied scenarios.

For cooling only air conditioners, the “MEPS 2012” scenario requires efficiency levels higher than those corresponding to the LLCC. As a result, this scenario is less beneficial to the end-user than the two other scenarios. However, it allows the most important environmental benefits.

Table 11. Average purchase price and LCC on the European market

		2005	2015	2025
BAU				
Purchase price [€/kW]	Reversible air conditioners	192	206	206
	Cooling only air conditioners	194	183	183
LCC [€/kW]	Reversible air conditioners	3963	3991	4251
	Cooling only air conditioners	1757	980	1088
MEPS 2015				
Price increase compared to the BAU scenario [%]	Reversible air conditioners	0	8	8
	Cooling only air conditioners	0	27	27
LCC increase compared to the BAU scenario [%]	Reversible air conditioners	0	- 4	- 5
	Cooling only air conditioners	0	- 21	- 25
LCCC				
Price increase compared to the BAU scenario [%]	Reversible air conditioners	0	14	18
	Cooling only air conditioners	0	27	27
LCC increase compared to the BAU scenario [%]	Reversible air conditioners	0	- 5	- 7
	Cooling only air conditioners	1	- 21	- 25
MEPS 2012				
Price increase compared to the BAU scenario [%]	Reversible air conditioners	0	19	42
	Cooling only air conditioners	0	35	46
LCC increase compared to the BAU scenario [%]	Reversible air conditioners	0	- 6	- 9
	Cooling only air conditioners	1	- 20	- 22

Two main trends should lead to mitigate the increase in total cost and/or purchase price increase. Manufacturers are developing products to install yourself in order to entail the installation costs. It is now the common situation for products sold in large retail and DIY shops. On the other hand, according to Koizumi (2007), for a given level of energy efficiency, a 10 to 17 % price decrease can be expected when the cumulated sales have doubled. Thus, in the “LLCC” scenario, the end-user overcost at the time of purchase would only be of 5 to 10 % of the total installation cost (as compared to 2006 total installation cost) for both air conditioners and heat pumps.

Regarding running costs, electricity prices could increase much more than forecasted in this study (1.5 % per year), especially given the fast increase of the price of gas and the pressure put on the utilities to install large power capacities to satisfy the demand of peak conditions for air conditioners and heat pumps.

Given the possible evolution of electricity prices and energy efficiency premium, it appears that future energy performance requirements could be more stringent than those proposed here and still be beneficial to the end-user.

5. DISCUSSION

5.1. Low environmental impact cooling

In this study, we did not aim at studying improvement actions on building envelope and usage. However, it is obvious that the first actions to apply to the building in order to limit overheating must consist in reducing internal and external heat loads (solar shading, reflective paintings...). In some cases, there are also some technical solutions to improve summer comfort while consuming less energy (comfort fans, mechanical ventilation...). All these actions enable, on the one hand, to reduce air conditioner energy consumptions and, on the other hand, to avoid air conditioning installation in some naturally ventilated buildings (naturally ventilated buildings still represent the most important part of the European building stock). As a result, these alternatives can turn out to be an important source of energy savings in a close future, especially if they can reduce significantly the penetration rate of individual air conditioning.

As an example, Grignon-Massé et al. (2009) studied several low environmental impact actions aiming at improving summer comfort on different kinds of buildings and for different European climates. They provided benchmarks of energy savings related to these actions. Regarding offices and retails, they found out that the installation of Venetian blinds and the reduction of internal loads (lighting and electric equipments) could already decrease discomfort hours up to 80 % and the cooling demand up to 90 %. For residences, Venetian blinds can largely reduce the cooling demand (between 50 % and 90 % depending on the building location).

5.2. Air conditioning and climate change

The impact of climate change was not integrated in this study. However, the analysis led by Jakob et al. (2008) on the consequences of this phenomenon on building energy consumptions shows that a dramatic growth of the electric consumption due to air conditioning is expectable. Indeed, cooling degree days could increase from 40 % in Southern Europe and up to more than 300 % in Scandinavia, compared to the current situation.

This increase in cooling degree days could turn out to be very important both in terms of energy consumption and in terms of penetration rate of air conditioning. According to Jakob et al. (2008), the building electric consumption in Europe (EU 27 plus Switzerland and Norway) could rise by 17 % in 2020 and 35 % in 2050 compared to a situation based on the actual climate with a BAU that already forecasts a 270 % increase of electricity consumption due to air conditioners in 2050 compared to 2005 without accounting for climate change.

6. CONCLUSIONS

The study presented in this paper focuses on the improvement of air conditioners performances. A methodology based on Life Cycle Analysis and Life Cycle Costs was applied. It appeared that the most important part of environmental impacts occurs during the use phase mainly because of energy consumption. Different improvement actions were studied at the product scale. These results were then generalised at the European level by studying, both environmentally and economically, different policy measures. The implementation of Minimum Energy Performance Standards in Europe can save up to 49 TWh and 20 MtCO₂eq in 2020 (a decrease of respectively 30 and 16 % compared to the BAU scenario) and still be economically beneficial to the European end-user.

The projected impact of individual air conditioning determined in this study (in terms of GHG emissions and energy consumption) as well as the eventuality of climate change stress the necessity to work on the implementation of policy measures aiming at reducing environmental impacts of air conditioning. They should consist in increasing environmental performances of air conditioners but also reducing the cooling demand in buildings and limiting the penetration of air conditioners in the building stock.

REFERENCES

- Adnot, J., et al., 1999. Energy Efficiency of Room Air-Conditioners (EERAC) for the Directorate General Transportation-Energy of the Commission of the European Union.
- Adnot, J., Santamouris, M., Alvarez, S., Klitsikas, N., Orphelin, M., Lopes, C., Sanchez, F., 2004. Cooling the Cities - Rafrachir les villes, Presses de l'Ecole des Mines de Paris.

Barrault, S., Clodic, D., Sayon, C., 2004. Inventaire des fluides frigorigènes et de leurs émissions, Document 2 : Données de base pour les inventaires de fluides frigorigènes, France.

The Building Services Research and Information Association (BSRIA), 2005. World Market for Air Conditioning, available on : www.bsria.co.uk.

Centre d'Etudes Techniques des Industries Mécaniques (CETIM), 2004. Résultats des actions collectives N° 695, Confinement des installations frigorifiques.

Commission of the European Communities (CEC), 2002a. Commission Directive 2002/31/EC of 22 March 2002 implementing Council Directive 92/75/EEC with regard to energy labelling of household air-conditioners.

Commission of the European Communities (CEC), 2002b. Directive 2002/96/EC of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003 on waste electrical and electronic equipment (WEEE).

Commission of the European Communities (CEC), 2005. Directive 2005/32/EC of the European Parliament and of the Council of 6 July 2005 establishing a framework for the setting of Ecodesign requirements for energy-using products.

Commission of the European Communities (CEC), 2006. Regulation 842/2006 of the European Parliament and of the Council of 17 May 2006 on certain fluorinated greenhouse gases.

Commission of the European Communities (CEC), 2009. Working document on possible ecodesign and energy labelling requirements for room air conditioning appliances, local air coolers and comfort fans, available on : http://ec.europa.eu/energy/efficiency/ecodesign/forum_en.htm.

Department Of Energy (DOE), Oak Ridge National Laboratory (ORNL), 2009. Heat Pump Design Model, Mark 7 Version, available on : <http://www.ornl.gov/~wlj/hpdm/MarkVII.shtml>.

Energy Conservation Centre, Japan (ECCJ), 2006. Final Summary Report by Air Conditioner Evaluation Standard Subcommittee, Energy Efficiency Standards Subcommittee of the Advisory Committee for Natural Resources and Energy, available on : http://www.eccj.or.jp/top_runner/pdf/tr_air_con_06.pdf.

Ellis M., 2007, Experience with energy efficiency regulations for electrical equipment, Information Paper, OECD/IEA.

European Committee for Standardization (CEN), 2006a. Standard EN 12900, Refrigerant compressors, Rating conditions, tolerances and presentation of manufacturer's performance data.

European Committee for Standardization (CEN), 2006b. Standard EN 15459, Heating systems in buildings - Data requirements for standard economic evaluation procedures related to energy systems in buildings, including renewable sources.

Eurovent, 2006. Eurovent public directory, available on : <http://www.euroventcertification.com/>.

Grignon-Massé, L., Marchio, D., Da Silva, D., Adnot, J., Rivière, P., Assessment of energy savings related to sustainable summer comfort, Work Package 4 of the Keep Cool II project, Transforming the market from "cooling" to "sustainable summer comfort", funded by the Intelligent Energy Europe (IEE) programme.

Hitchin, R., Pout, C., 2008. Trends in the European Air Source Heat Pump Market, IEA Heat Pump Newsletter, Volume 26 "Air Source Heat Pumps".

Hitchin, R. (Technical Director at BRE), 2007. Personal communication on the "UK transformation program".

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2005. Special Report on Safeguarding the Ozone Layer and the Global Climate System Issues related to Hydrofluorocarbons and Perfluorocarbons, Chapter 5.

International Organization for Standardization (ISO), 1994. Standard ISO 5151, Non-ducted air conditioners and heat pumps. Testing and rating for performance.

International Organization for Standardization (ISO), 1995. Standard ISO 13253, Ducted air-conditioners and air-to-air heat pumps. Testing and rating for performance.

Jakob, M., Catenazzi, G., Jochem, E., Shukla, A., 2008. Adaptation to and mitigation of climate change in the tertiary sector of Europe, proceedings of the IEECB conference 2008, Frankfurt.

Jakobsen, D. et al., 2006. Development of reversible residential air conditioners and heat pumps using CO₂ as working fluid, IEA Heat Pump Center Newsletter, Volume 24 – No. 3/2006.

Koizumi, S., 2007. Energy Efficiency of Air Conditioners in Developing Countries and the Role of CDM, Information paper, OECD/IEA.

MCE and NZNEECS, Ministerial Council on Energy forming part of the Australian National Framework for Energy Efficiency and the New Zealand National Energy Efficiency and Conservation Strategy, March 2006. 2005 Intrusive Residential Standby Survey Report, Report for E3 2006/02.

Orphelin, M., 1999. Méthodes pour la reconstitution de courbes de charge agrégées des usages thermiques de l'électricité, thèse de doctorat de l'Ecole des Mines de Paris.

Ortiz, T., Li, D., Groll, A., 2003. Evaluation of the performance potential of CO₂ as a refrigerant in air to air conditioners and heat pumps: system modelling and analysis, ARTI-21CR/610-10030.

Pout, C., Hitchin, R., 2009. Future environmental impacts of room air-conditioners in Europe, Building Research & Information, 237(4), 358-368.

Rivière, P., Grignon-Massé, L., 2008. Existing seasonal performance indices for air-to-air heat pumps, IEA Heat Pump Centre Newsletter Volume 26 - No. 1/2008.

Rivière, P., et al., 2009. Preparatory study on the environmental performance of residential room conditioning appliances (airco and ventilation), available on : www.ecoaircon.eu/.

United Nations Environment Programme (UNEP), 2003. Report of the Refrigeration, Air Conditioning and Heat Pumps Technical Options Committee – 2002 Assessment, UNEP Ozone Secretariat, Nairobi, Kenya.

Van Holsteijn en Kemna (VHK), 2005. Methodology Study Eco-design of Energy-using Products (MEEUP), available on: http://www.vhknet.com/download/MEEUP_Methodology_fin.pdf.

Van Holsteijn en Kemna (VHK), 2009. Preparatory study on eco-design of CH-boilers, available on : <http://www.ecoboiler.org/>.

Développement d'une méthodologie d'analyse coût-bénéfice en vue d'évaluer le potentiel de réduction des impacts environnementaux liés au confort d'été : cas des climatiseurs individuels fixes en France métropolitaine.

RESUME : Le développement de la climatisation individuelle est une préoccupation grandissante pour les pouvoirs publics français. Dans ce cadre, cette thèse vise à évaluer, sous l'angle de l'Analyse Coût-Bénéfice (ACB), des solutions permettant de concilier amélioration du confort d'été et réduction des impacts environnementaux.

Après avoir éclairci le concept d'ambiance climatique confortable, des méthodes de monétisation de l'inconfort et des externalités sont développées en vue d'être intégrées dans l'évaluation économique d'actions d'amélioration du confort d'été.

Les potentiels d'actions portant sur l'enveloppe et l'usage des bâtiments sont ensuite quantifiés en termes de réduction des besoins de refroidissement (locaux climatisés) et d'amélioration du confort d'été (locaux non climatisés). Des stratégies efficaces de lutte contre l'inconfort sont identifiées. Il apparaît d'autre part que les rénovations d'enveloppe des bâtiments, réalisées en vue de réduire les besoins de chauffage, peuvent fortement détériorer le confort d'été. Les potentiels d'amélioration des performances environnementales des climatiseurs sont ensuite estimés, ce qui nécessite le développement d'une méthode d'évaluation de l'efficacité énergétique saisonnière des appareils. L'Analyse en Cycle de Vie réalisée montre que l'atténuation des impacts requiert de se concentrer sur la réduction des consommations électriques puis sur le cycle de vie du fluide frigorigène.

Enfin, l'ACB d'actions d'amélioration du confort d'été est réalisée, puis complétée par un travail prospectif d'estimation des impacts de la climatisation dans le parc existant français. La superficie climatisée pourrait croître de 650 % d'ici 2030, le secteur résidentiel représentant alors l'essentiel des surfaces (90 %). Des mesures de maîtrise de la demande d'énergie, associées à la récupération des fluides frigorigènes, peuvent néanmoins réduire fortement les impacts engendrés.

Mots clés : *Confort d'été, Climatisation individuelle, Analyse Coût-Bénéfice, Maîtrise de la Demande d'Energie, Efficacité énergétique, Réduction des émissions de gaz à effet de serre.*

Development of a cost benefit analysis methodology for evaluating the mitigation potential of environmental impacts due to summer comfort : the case of fixed room air conditioners in metropolitan France.

ABSTRACT : The development of individual air-conditioning is a growing concern for the French authorities. In this context, this thesis aims at carrying out a Cost-Benefit Analysis (CBA) in order to evaluate solutions that allow to reconcile summer comfort improvement and environmental impact reduction.

After clarifying the concept of indoor summer comfort, methods are developed for monetizing discomfort and externalities. These costs must be taken into account for the economical evaluation of summer comfort improvement actions.

The potential of actions related to the building envelope are then quantified in terms of cooling needs reduction (conditioned rooms) and summer comfort improvement (non air-conditioned rooms). If efficient strategies to reduce discomfort are identified, it also appears that building thermal renovations, realized in order to decrease heating needs, can significantly impair summer comfort. Then, the potential for improving the environmental performance of air conditioners is assessed, which requires the development of a method for evaluating their seasonal energy efficiency. A Life Cycle Analysis is performed and shows that the environmental impact mitigation requires a focus on the reduction of electric consumptions and, to a lesser extent, on the life cycle of working fluids.

Finally, a CBA of summer comfort improvement actions is carried out and completed by a forecasting study on future environmental impacts due to room air conditioning in the French building stock. The total conditioned area could increase by 650 % by 2030, most of which being constituted by the residential sector (90 %). Nevertheless, demand side management measures, associated to the recovery of working fluids, can significantly reduce generated impacts.

Keywords : *Summer comfort, Room Air Conditioner, Cost-Benefit Analysis, Demand Side Management, Energy efficiency, Greenhouse gases mitigation.*